



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

VERÓNICA MORENO ARGÜELLO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS
CERÂMICAS DE ALUMINA PARA USO COMO
QUEIMADORES RADIANTES**

Florianópolis, março de 2009

VERÓNICA MORENO ARGÜELLO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS
CERÂMICAS DE ALUMINA PARA USO COMO
QUEIMADORES RADIANTES**

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Santa Catarina para a ob-
tenção do grau de Mestre em Ciência
e Engenharia de Materiais

Orientador

Dachamir Hotza, Dr.

Coorientador

Carlos Renato Rambo, Dr.

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, área de concentração Cerâmica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

DACHAMIR HOTZA, DR. , EQA/UFSC, ORIENTADOR

CARLOS RENATO RAMBO, DR., EQA/UFSC, COORIENTADOR

CARLOS AUGUSTO SILVA DE OLIVEIRA, DR., EMC/UFSC,
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA



ANTÔNIO PEDRO NOVAES DE OLIVEIRA, DR., EMC/UFSC,
PRESIDENTE



JULIO C. LLÓPIZ, DR., UNIVERSIDAD DE LA HABANA, CUBA,
MEMBRO EXTERNO

AMIR ANTÔNIO MARTINS DE OLIVEIRA JÚNIOR, DR.,
EMC/UFSC, MEMBRO INTERNO

*A mi mamá, por ser mi mayor apoyo
y por ser simplemente mi mamá.
A mi papá, por ser el ejemplo a seguir
y por siempre creer en mí.
A Mariana, por ser la mejor hermana.
A mis abuelitos, por el apoyo
y por estar siempre a mi lado, los amo.
A Alejo y Rorosa, porque estuvieron, están y estarán siempre.*

Agradecimentos

Ao meu orientador Dachamir Hotza, pela confiança depositada em mim, por me guiar e proporcionar todos os elementos necessários para o pleno desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Coorientador Carlos Renato Rambo, pelos conhecimentos e conselhos transmitidos, os quais foram imprescindíveis para a culminação deste trabalho.

Ao Jairo Escobar, Professor, orientador e amigo, que sem sua confiança e ajuda este trabalho não teria sido possível. Muito Obrigada.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT) e aos laboratórios LABMAT, LABMAC, CERMAT e LCP por consentir-me desenvolver o trabalho em suas instalações.

Ao Professor Wilson Acchar e ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelas análises realizadas de resistência mecânica a alta temperatura.

Ao Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (LABCET), em especial ao Professor Amir Antônio Martins de Oliveira Jr., aos estudantes de Pós-Graduação Fernando Pereira e Rafael Catapan e ao estudante de Iniciação Científica Gabriel Medeiros, pela realização dos testes da cerâmica nos queimadores radiantes.

Ao Professor Miguel Quintero por ter conseguido as espumas de poliuretano necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de laboratório (Karina, Janaina, Daliana e Daniel) pela ajuda e apoio.

A Elisângela e Priscila pela ajuda e disposição.

À minha família (Ito, Ita, Sisi, Mamel, Mani, Caro, Milla, Mena, Carlos e Esteban) pelo apoio e por estarem sempre ao meu lado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Colombianos (Cindy, Yesid, Rodrigo, Álvaro, Jaime, Sergio, Dairo, Leonardo, Lury, Luis Evelio, Vladimir, Mono Jesus e Raquel), que são minha família no Brasil.

Ao Renzo, por me apoiar e estar sempre comigo.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO | 22 |
| 1.1 Introdução | 22 |
| 1.2 Objetivos | 23 |
| CAPITULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 24 |
| 2.1 Sólidos celulares | 24 |
| 2.1.1 <i>Estrutura da célula</i> | 24 |
| 2.1.2 <i>Morfologia</i> | 26 |
| 2.2 Cerâmicas celulares..... | 28 |
| 2.3 Reologia | 33 |
| 2.3.1 <i>Viscosidade</i> | 33 |
| 2.3.2 <i>Comportamento reológico de suspensões cerâmicas independentes do tempo</i> | 34 |
| 2.3.3 <i>Comportamentos reológico de suspensões cerâmicas dependentes do tempo</i> | 36 |
| 2.4 Caracterização de estrutura e morfologia | 38 |
| 2.4.1 <i>Método de poros por polegada (PPI)</i> | 38 |
| 2.4.2 <i>Análise de imagem</i> | 38 |
| 2.4.3 <i>Microscopia eletrônica de varredura</i> | 38 |
| 2.5 Propriedades..... | 39 |
| 2.5.1 <i>Propriedades mecânicas</i> | 39 |
| 2.5.2 <i>Densidade relativa</i> | 40 |
| 2.5.3 <i>Permeabilidade</i> | 41 |
| 2.5.4 <i>Análise termogravimétrica</i> | 42 |
| 2.6 Matérias primas | 42 |
| 2.6.1 <i>Alumina</i> | 42 |
| 2.6.2 <i>Espumas de poliuretano</i> | 43 |
| 2.7 Aplicações de Espumas Cerâmicas | 43 |
| CAPITULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 3.1 Materiais | 46 |
| 3.2 Planejamento experimental | 47 |
| 3.3 Preparação das misturas cerâmicas | 49 |
| 3.3.1 <i>Distribuição de tamanho de partícula</i> | 49 |
| 3.4 Reologia | 49 |
| 3.5 Implementação do método da réplica | 49 |
| 3.5.1 <i>Suspensão de alumina</i> | 49 |
| 3.5.2 <i>Impregnação e secagem das espumas</i> | 50 |
| 3.5.3 <i>Tratamento térmico</i> | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6 Caracterização espumas cerâmicas | 52 |
| 3.6.1 <i>Morfologia e microestrutura</i> | 52 |
| 3.6.2 <i>Resistência mecânica</i> | 53 |
| 3.6.3 <i>Resistência mecânica à alta temperatura</i> | 53 |
| 3.6.4 <i>Densidade relativa e porosidade</i> | 53 |
| 3.6.5 <i>Porcentagem de retração volumétrica</i> | 54 |
| 3.6.6 <i>Permeabilidade</i> | 54 |
| 3.6.7 <i>Análise de imagem</i> | 54 |
| 3.7 Testes nos queimadores radiantes | 54 |
| CAPITULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 57 |
| 4.1 Análise estatística | 57 |
| 4.2 Reologia | 58 |
| 4.3 Caracterização das espumas cerâmicas | 64 |
| 4.3.1 <i>Resistência mecânica</i> | 64 |
| 4.3.2 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> | 66 |
| 4.3.3 <i>Análise de imagem</i> | 68 |
| 4.3.4 <i>Retração volumétrica</i> | 71 |
| 4.3.5 <i>Densidade relativa e porosidade</i> | 73 |
| 4.3.6 <i>Resistência à flexão a alta temperatura</i> | 76 |
| 4.3.7 <i>Permeabilidade</i> | 77 |
| 4.4 Testes como Queimadores radiantes | 78 |
| CAPITULO 5: CONCLUSÕES..... | 83 |
| 5.1 Conclusões | 83 |
| 5.2 Recomendações para trabalhos futuros | 84 |
| CAPITULO 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Célula unitária de 14 lados de célula (GIBSON, 1997)..... | 25 |
| Figura 2. Empacotamento de células em 2D para encher o plano. (a, b) dois empacotamentos de triângulos equiláteros, (c,d) dois empacotamentos de quadrados, (e) empacotamento de hexágonos regulares, (f) empacotamento de hexágonos irregulares. (GIBSON, 1997) | 26 |
| Figura 3. Células poliédricas em 3D: (a) tetraedro, (b) prisma triangular, (c) prisma retangular, (d) prisma hexagonal, (e) octaedro, (f) dodecaedro rômboico, (g) dodecaedro pentagonal, (h) tetraidecaedro, (i) icosaedro. (GIBSON, 1997)..... | 27 |
| Figura 4. Poliedros de empacotamento para encher espaço: (a) prisma triangular, (b) prisma retangular, (c) prisma hexagonal, (d) dodecaedro rômboico, (e) tetraidecaedro. (GIBSON, 1997) | 27 |
| Figura 5. Imagem amostras espumas cerâmicas (LÁNÍK, 2007) | 28 |
| Figura 6. Métodos de fabricação cerâmica celular (STUDART ET AL., 2006) | 29 |
| Figura 7. Diagrama de fluxo do procedimento do método da réplica (SARMIENTO, 2006)..... | 30 |
| Figura 8. Diferentes comportamentos reológicos independentes do tempo (DINGER, 2002) | 34 |
| Figura 9. Reograma típico de fluidos com comportamento pseudoplástico (GOMES, 2004) | 35 |
| Figura 10. Comportamentos reológicos dependentes do tempo. Esquerda: Comportamento tixotrópico, direita: comportamento reopéxico (GOMES, 2004) | 36 |
| Figura 11. Reograma de um fluido tixotrópico (DINGER, 2002) | 37 |
| Figura 12. Reograma de um fluido reopéxico (DINGER, 2002) | 37 |
| Figura 13. Célula unitária ideal (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004) .. | 39 |
| Figura 14. (a) Dobramento das paredes da célula, (b) Deformação das paredes da célula, (c) Fratura das paredes da célula (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004)..... | 40 |
| Figura 15. Queimador radiante laboratorial (PEREIRA, 2002) | 45 |
| Figura 16. Espumas poliuretano utilizadas no processo da replica (FOAM PARTNER, Fritz & Nauer AG, Alemanha) | 46 |
| Figura 17. Análise termogavimétrica, curvas TGA e DTG (SARMIENTO, 2006)..... | 50 |
| Figura 19. Sinterização a 1500°C, 1550°C e 1600°C | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 20. Esquema do queimador poroso radiante utilizado para os testes da cerâmica celular de alumina | 55 |
| Figura 21. Gráfico de pareto dos resultados dos efeitos | 57 |
| Figura 22. Imagem das amostras após da primeira etapa do tratamento térmico | 58 |
| Figura 23. Distribuição de tamanho de partícula antes da moagem..... | 59 |
| Figura 24. Distribuição de tamanho de partícula após a moagem | 59 |
| Figura 25. Tixotropia das diferentes suspensões | 60 |
| Figura 26. Tensão vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 5% ligante, 1% y 2% dispersante (silicato de sódio y polimetacrilato de amônio).. | 61 |
| Figura 27. Tensão vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 10% ligante (PVA), 1% y 2% dispersante (silicato de sódio y polimetacrilato de amônio) | 61 |
| Figura 28. Tensão vs. taxa de cisalhamento para a suspensão com ligante PVA e acrílico | 62 |
| Figura 29. Viscosidade vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 5% ligante (PVA e acrílico), 1% dispersante (silicato de sódio e polimetacrilato de amônio) | 63 |
| Figura 30. Imagem comparativa das amostras com ligante acrílico e PVA apos a degradação térmica do polímero | 64 |
| Figura 31. Gráfico comparativo da resistência mecânica em função da temperatura de sinterização das espumas de alumina | 65 |
| Figura 32. Micrografias MEV de amostras sinterizadas a 1500°C (a), 1550°C (b) e 1600°C (c)..... | 66 |
| Figura 33. Micrografias das espumas sinterizadas 1600°C, (a e c) aumento 50× espuma A e B respectivamente (c e d) aumento 100× espuma A e B respectivamente | 67 |
| Figura 34. Imagens binarizada de espumas cerâmicas A..... | 69 |
| Figura 35. Distribuição de tamanho de poro das espumas cerâmicas A | 69 |
| Figura 36. Imagens binarizadas das amostras das espumas cerâmica B | 70 |
| Figura 37. Distribuição de tamanho de poro das espumas cerâmicas .. | 70 |
| Figura 38. Retração volumétrica das espumas sinterizadas em diferentes temperaturas de sinterização | 72 |
| Figura 39. Amostras sinterizadas 1550°C (esquerda) e 1600°C (direita) | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 4. Poliedros de empacotamento para encher espaço: (a) prisma triangular, (b) prisma retangular, (c) prisma hexagonal, (d) dodecaedro rômbo, (e) tetraidecaedro. (GIBSON, 1997) | 27 |
| Figura 40. Distribuição de porosidade da espuma cerâmica A com a temperatura de sinterização | 74 |
| Figura 41. Distribuição de porosidade da espuma cerâmica B com a temperatura de sinterização | 74 |
| Figura 42. Resistência mecânica vs densidade relativa | 75 |
| Figura 43. Ensaio de resistência mecânica a 800°C das espumas A e B sinterizadas a 1600°C | 77 |
| Figura 44. Comparação da permeabilidade (valor de fluxo de ar) das espumas de poliuretano e espumas cerâmicas..... | 77 |
| Figura 45. Sequência de como a chama entra na estrutura porosa..... | 79 |
| Figura 46. Imagem do queimador com a chama completamente dentro da estrutura porosa | 80 |
| Figura 47. Temperatura superficial vs. velocidade da chama | 81 |
| Figura 48. Imagens da estrutura cerâmica do queimador após os testes de combustão..... | 82 |
| Figura 5. Imagem amostras espumas cerâmicas (LÁNÍK, 2007) | 28 |
| Figura 6. Métodos de fabricação cerâmica celular (STUDART ET AL., 2006) | 29 |
| Figura 7. Diagrama de fluxo do procedimento do método da réplica (SARMIENTO, 2006)..... | 30 |
| Figura 8. Diferentes comportamentos reológicos independentes do tempo (DINGER, 2002) | 34 |
| Figura 9. Reograma típico de fluidos com comportamento pseudoplástico (GOMES, 2004) | 35 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Características das Espumas Poliuretano..... | 46 |
| Tabela 2. Análise Química da Alumina (Al_2O_3) | 47 |
| Tabela 3. Análise Física da Alumina (Al_2O_3)..... | 47 |
| Tabela 4. Fatores e níveis planejamento fatorial completo 2^4 | 48 |
| Tabela 5. Planejamento experimental fatorial completo 2^4 | 48 |
| Tabela 6. Análise de variância para o comportamento tixotrópico da suspensão | 57 |
| Tabela 7. Resultados da porosidade determinada pelos diferentes métodos | 71 |
| Tabela 8. Densidade relativa e porosidade das espumas de poliuretano | 75 |
| Tabela 9. Valores fluxo de ar | 78 |

RESUMO

Espumas cerâmicas são cerâmicas porosas celulares que podem ser produzidas por diferentes métodos, dentre os quais se encontram réplica, sacrifício de *template* e espumação direta. Espumas cerâmicas possuem propriedades distintas que fazem delas um material muito versátil, utilizado em diferentes aplicações, tais como queimadores radiantes porosos. Os queimadores são constituídos de uma cerâmica que, além de resistir a temperaturas elevadas ($>1000^{\circ}\text{C}$), deve apresentar alta resistência ao choque térmico. Neste trabalho, foi utilizado o método da réplica para a obtenção de espumas de alumina. Espumas de poliuretano foram impregnadas com suspensões aquosas de 50-60% em massa de sólidos (Al_2O_3) e aditivos (ligante e dispersante). Um planejamento experimental foi projetado para estabelecer as concentrações adequadas de cada um dos componentes dentro da suspensão. A viscosidade e a tixotropia da suspensão foram avaliadas e ajustadas a uma impregnação adequada das espumas poliméricas. As espumas poliméricas foram impregnadas e submetidas a um tratamento térmico para a degradação térmica de poliuretano a 400°C durante uma hora e subsequentemente sinterizadas a temperaturas entre 1500°C e 1600°C durante 3 h para a densificação dos filamentos e paredes celulares. As espumas de alumina obtidas foram caracterizadas mediante análises de resistência à compressão, resistência à flexão a alta temperatura, permeabilidade, morfologia e porosidade. A permeabilidade e a resistência à compressão das espumas foram correlacionadas à microestrutura e à morfologia celular. A resistência à flexão a alta temperatura foi utilizada para prever o comportamento mecânico das espumas quando utilizadas nos queimadores radiantes. Testes em um queimador piloto foram realizados. Diferentes relações de ar-combustível e velocidades de chama nos queimadores foram avaliadas. A temperatura de sinterização que apresentou melhores resultados foi 1600°C , que promoveu maior densificação nas paredes das células e aumento na resistência mecânica. Concluiu-se que a porosidade está diretamente relacionada com a temperatura de sinterização. As espumas se tornaram pouco resistentes a altas temperaturas podendo comprometer o seu funcionamento nos queimadores radiantes. Com uma razão mistura reagente contendo 5% de combustível em volume com 100% de excesso de ar, a chama foi estabilizada em uma velocidade de chama de 30 a 36 cm/s, em temperaturas superiores a 1150°C .

ABSTRACT

Ceramic foams are cellular porous ceramics that can be produced by different methods, like replica method, sacrificial template method and direct foaming method. Foams are a type of porous ceramic which present many properties making them a very versatile material, used in different applications, like radiant porous burners. Radiant burners consist of ceramic materials which must resist at high temperatures ($> 1500^{\circ}\text{C}$) and provide high thermal shock resistance. In this work, the replication method was used to obtain alumina foams. Polyurethane foams were impregnated with aqueous suspensions of 50-70% wt. solid (Al_2O_3) and additives (binders and dispersants). An experimental design was made to establish the appropriate concentration of each component in the suspension. The viscosity and the thixotropy of the suspension were evaluated and adjusted to an appropriate impregnation of the polymeric foam. The impregnated foams were heat treated for degradation of polyurethane at $400^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ and subsequently sintered (between 1500°C and $1600^{\circ}\text{C}/3\text{h}$) for densification of the struts and cell walls. The alumina foams obtained were characterized by analysis of compression strength, flexural strength at high temperature, permeability, porosity and morphology. Permeability and compressive strength of the foams were correlated to the microstructure and cellular morphology (size and geometry of the cells). Flexural strength at high temperature was used to predict the mechanical behavior of the foams when used in radiant burners. Tests on a pilot radiant burner were also performed. Different air-fuel ratios and flame rates were evaluated. The sintering temperature of 1600°C promoted higher densification and increase in mechanical strength. It was found that the porosity is directly related to the sintering temperature. The low mechanical strength of the ceramic foams at high temperatures may compromise their performance in radiant burners. With a 5% vol. fuel and 100% excess air mixture reagent, the flame stability at a rate of 30 to 36 cm/s was reached at temperatures higher than 1150°C .

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

As espumas cerâmicas são materiais que se caracterizam por ter propriedades tais como baixa condutividade térmica, baixa densidade, resistência ao choque térmico, alta permeabilidade, entre outras (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006; BINNER, SAMBROOK, 2008).

Atualmente, estes materiais, devido a suas propriedades, têm múltiplas aplicações na indústria. Exemplos dessas aplicações são queimadores radiantes, filtros para motor a diesel, filtros de fundição de metais, filtração de gases a altas temperaturas, isolamento térmico, suportes para catalisadores e trocadores de calor (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006; REY VILLALVA, 2006).

Existem diferentes métodos de fabricação de espumas cerâmicas: (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006)

- Método da réplica
- Método de espumação direta
- Método de sacrifício de *template*

O método da espuma polimérica (PSM – *polymeric sponge method*), também conhecido como método da réplica, oferece uma maneira simples, econômica e versátil de fabricar espumas cerâmicas (STUDART ET AL., 2006).

O processo consiste na impregnação de uma espuma de sacrifício, polimérica e de células abertas, com uma suspensão cerâmica. O excesso de suspensão na espuma após a impregnação é removido e a amostra é levada ao processo de secagem. Posteriormente, a espuma polimérica é queimada e finalmente o material cerâmico é sinterizado. O resultado final desse processo é uma cerâmica celular com a morfologia inicial da espuma polimérica de sacrifício ou *template* (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006; REY VILLALVA, 2006).

Este trabalho pretende desenvolver e implementar um procedimento de obtenção das espumas cerâmicas de alumina adequadas para

ser utilizadas em queimadores radiantes, devido à grande utilidade e demanda destes materiais na indústria.

1.2 Objetivos

Objetivo geral

- Obter espuma cerâmica de Al_2O_3 a partir de espuma de poliuretano para a fabricação de queimadores radiantes.

Objetivos específicos

- Obter uma adequada composição da suspensão (Al_2O_3 , solvente, aditivos) e assim conseguir uma boa impregnação na espuma de PU.
- Caracterizar a espuma de Al_2O_3 do ponto de vista físico e no uso final como queimador radiante
- Testar as espumas nos queimadores radiantes

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sólidos celulares

2.1.1 Estrutura da célula

Os sólidos celulares são estruturas formadas por um conjunto de células com bordas ou faces sólidas, empacotadas para preencher um espaço. Do ponto de vista geométrico, uma estrutura celular pode ser vista como vértices, unidos por arestas, que cercam faces que envolvem células (GIBSON, 1997).

Existem três tipos de estruturas, as quais podem ser de ordem quase perfeita, como uma colméia, ou desordenadas, como as redes tridimensionais das esponjas e/ou espumas. As primeiras são chamadas de *honeycombs* ou colméias. São arranjos simples, em duas dimensões, de células em forma de hexágonos empacotados conjuntamente. Os outros dois tipos de estruturas são chamadas de *foams* ou espumas. Esse tipo se caracteriza por ter arranjos em três dimensões de células em forma de poliedros. As estruturas de espuma se dividem em dois tipos: as de célula aberta e as de célula fechada. As de célula aberta se caracterizam por terem as arestas sólidas e estarem ligadas entre si por meio de faces abertas. As de célula fechada se caracterizam por terem as faces oclusas quanto às arestas sólidas. (GIBSON, 1997)

As propriedades dos sólidos celulares dependem diretamente de sua topologia e do material. Podem ser de tipo cerâmico, polimérico e metálico. As de tipo polimérico são as que mais têm sido estudados e os conhecimentos que se tem deste tipo de sólidos celulares têm permitido estudar os outros tipos com maior facilidade (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

Os sólidos celulares cerâmicos estão adquirindo maior importância na indústria, sendo necessário ter um maior conhecimento sobre os mesmos (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

Estruturas tipo colméia

A estrutura tipo colméia (estrutura em 2 dimensões) é a mais estudada de todas as estruturas celulares (Figura 1). São fabricadas de material cerâmico e aplicadas em suportes de catalisadores e componentes de trocadores de calor. Também podem ser feitas de metal e papel para outras aplicações. A maioria dessas estruturas é formada por arran-

jos de células em forma hexagonal, mas também existem estruturas formadas por células em forma triangular e quadrada (GIBSON, 1997).

Uma colméia tem células pequenas com menos de três lados e células grandes com mais de nove lados. Se a ligação for fixa, o número de arestas por célula pode ser determinado por leis topológicas.

Estruturas tipo espuma

A estrutura tipo espuma é uma estrutura tridimensional (Figura 2), na qual a orientação das paredes de suas células é aleatória.

Este tipo de estrutura pode ser de célula aberta ou de célula fechada. As de célula fechada se caracterizam por ter células seladas e separadas (faces da célula são sólidas), enquanto que os de célula aberta se caracterizam por ter suas células unidas pelas bordas (GIBSON, 1997; SARMIENTO, 2006).

Em estudos relativamente recentes, WEAIRE e PHELAN (1994) identificaram uma célula unitária, a qual esta feita de 14 lados de célula, sendo 12 faces pentagonais e 2 hexagonais; e dois dodecaedros, todos de volume igual como se apresenta na Figura 1.

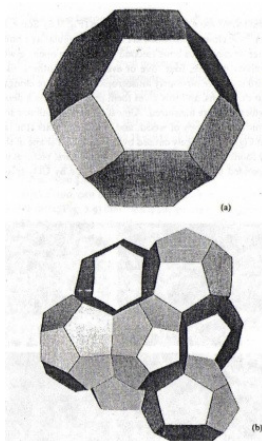


Figura 1. Célula unitária de 14 lados de célula (GIBSON, 1997)

Espumas podem ser fabricadas de qualquer material, como metal, polímero ou cerâmica. Suas propriedades dependem de parâmetros que descrevem a estrutura geométrica da espuma, o tamanho e a forma de suas células, a forma em que o material se distribui entre os lados e

as faces de célula, sua densidade relativa e sua porosidade, assim como também estão relacionadas com as propriedades do material do qual as paredes das células são feitas (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; GIBSON, 1997).

2.1.2 Morfologia

Forma, tamanho e topologia

Existem diferentes formas em que a célula unitária pode se empacotar em duas dimensões, seja para células isotrópicas ou anisotrópicas (GIBSON, 1997).

As células podem apresentar estruturas com conectividade e propriedades diferentes, para uma mesma forma geométrica de célula (Figura 2).

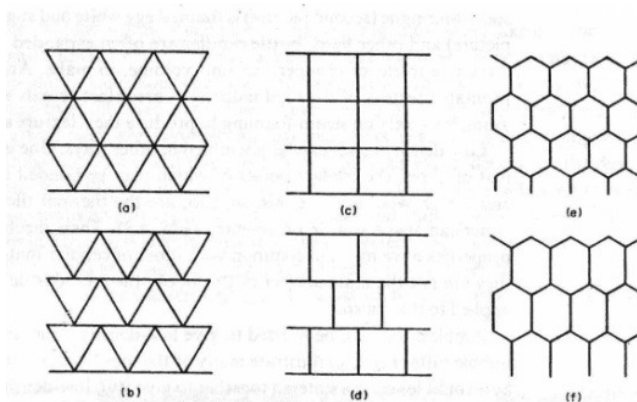


Figura 2. Empacotamento de células em 2D para preencher o plano. (a, b) dois empacotamentos de triângulos equiláteros, (c,d) dois empacotamentos de quadrados, (e) empacotamento de hexágonos regulares, (f) empacotamento de hexágonos irregulares. (GIBSON, 1997)

Em três dimensões existe também uma grande variedade de formas possíveis que podem empacotar-se para preencher o espaço (Figura 3).

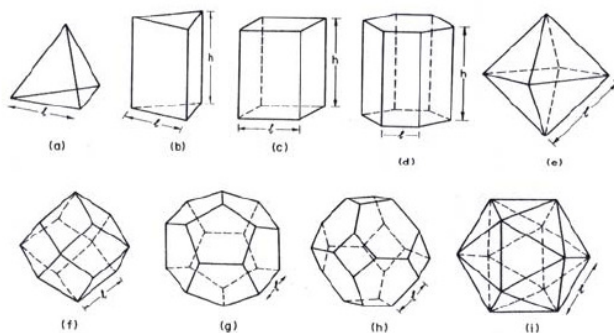


Figura 3. Células poliédricas em 3D: (a) tetraedro, (b) prisma triangular, (c) prisma retangular, (d) prisma hexagonal, (e) octaedro, (f) dodecaedro rômico, (g) dodecaedro pentagonal, (h) tetraidecaedro, (i) icoaedro. (GIBSON, 1997)

De todas as formas, somente prisma triangular, retangular e hexagonal, dodecaedro rômico e o tetracaidecaedro (ver Figura 4) são estruturas geométricas que de fato podem preencher todo o espaço (GIBSON, 1997).

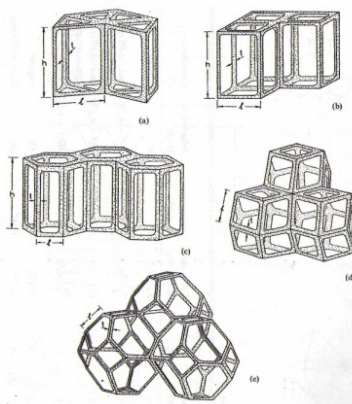


Figura 4. Poliedros de empacotamento para preencher espaço: (a) prisma trian-gular, (b) prisma retangular, (c) prisma hexagonal, (d) dodecaedro rômico, (e) tetraidecaedro. (GIBSON, 1997)

Grande parte das estruturas tipo espuma não apresenta empacotamento regular, com unidades idênticas, mas contem células de formas

e tamanhos diferentes. A aleatoriedade das células, quanto à forma, das espumas obedece a leis topológicas. A maioria das estruturas tipo colméia e todas as espumas apresentam diferentes tamanhos de células, as quais podem conter células centenas de vezes maiores do que as outras. Esta dispersão no tamanho de célula não implica anisotropia, mas está relacionada à forma como o material foi feito (GIBSON, 1997).

2.2 Cerâmicas celulares

As cerâmicas celulares são materiais com alta porosidade, que nos últimos anos têm adquirido muita importância devido a propriedades como baixa condutividade térmica e elétrica, entre outras (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004). As espumas cerâmicas estão compreendidas dentro deste tipo de materiais.

Na maioria dos materiais, a porosidade não é uma característica desejável, mas, quando se tem um adequado controle desta, podem-se obter sólidos, como as espumas cerâmicas, com propriedades excepcionais, difíceis de alcançar (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006). As espumas cerâmicas (ver Figura 5) por suas propriedades como: alta permeabilidade, baixa densidade, bom isolamento térmico, alta área superficial e resistência ao choque térmico, entre outras, são muito empregadas nas indústrias de fabricação de queimadores radiantes, filtros de fundição de metais, de gases, etc. (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUDART ET AL., 2006).



Figura 5. Imagem amostras espumas cerâmicas (LÁNÍK, 2007)

Existem diferentes métodos de fabricação de espumas cerâmicas, entre os quais se encontra o método da réplica, que foi utilizado neste trabalho. A Figura 6 mostra uma representação de todos os métodos.

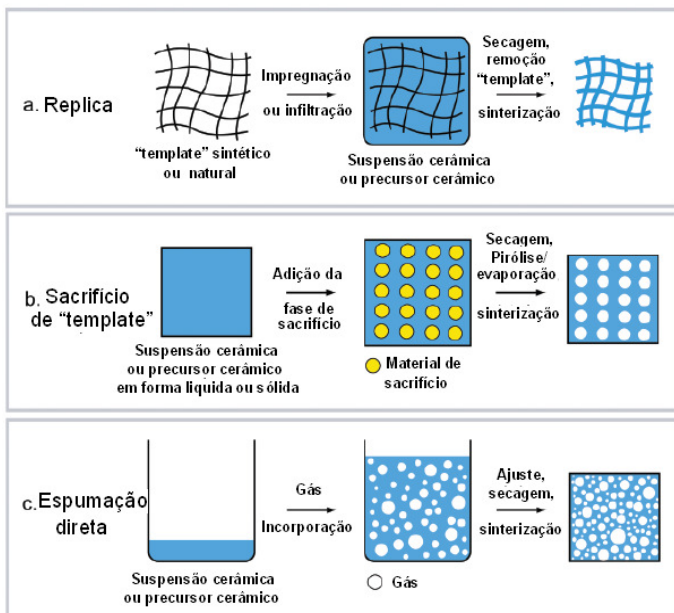


Figura 6. Métodos de fabricação cerâmica celular (STUDART ET AL., 2006)

O método a utilizar depende basicamente da aplicação e das propriedades finais das cerâmicas celulares.

Método da réplica

O método da réplica é provavelmente o mais utilizado na fabricação deste tipo de estrutura cerâmica.

O processo consiste na impregnação de uma espuma polimérica de sacrifício com células abertas por meio de uma suspensão cerâmica.

O excesso de suspensão na espuma após a impregnação é removida e a amostra é levada a um processo de secagem, para depois se

degradar termicamente a espuma polimérica, e finalmente o material cerâmico é sinterizado.

O resultado final deste processo é uma cerâmica celular com a forma inicial da espuma polimérica de sacrifício ou *template* (REY VILLALVA, 2006).

Mediante este método, procura-se produzir uma espuma cerâmica mais semelhante possível (quanto à porosidade) à espuma polimérica. A implementação do método segue as etapas apresentadas na Figura 7.

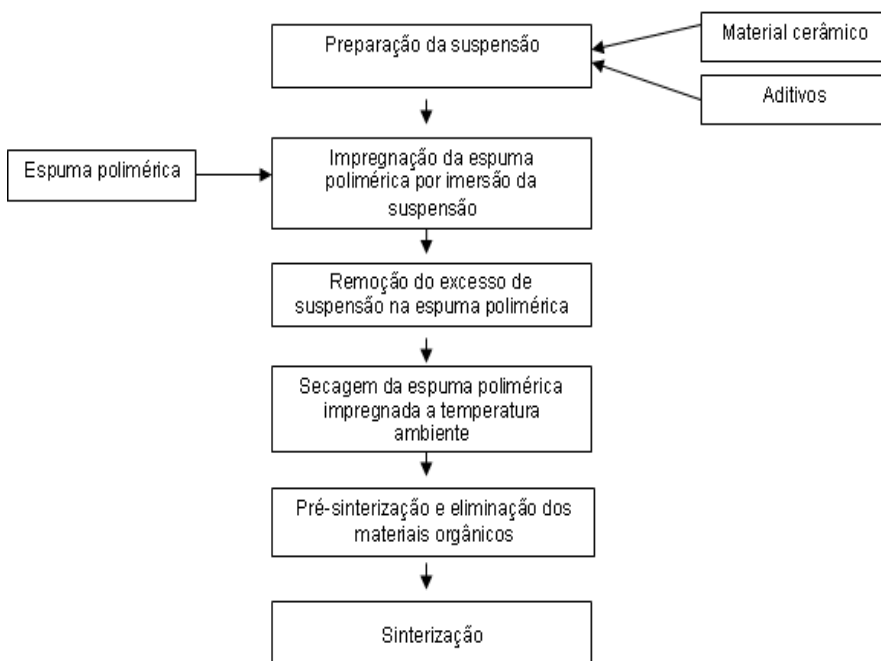


Figura 7. Diagrama de fluxo do procedimento do método da réplica (SARMIENTO, 2006)

O método da réplica pode ser dividido em três etapas principais: (STUDART ET AL., 2006)

- Preparação da suspensão cerâmica
- Impregnação da espuma polimérica

- Tratamento térmico (degradação térmica da espuma polimérica e sinterização)

A preparação da suspensão cerâmica tem muita importância, porque ela deve ter composição e viscosidade apropriadas para conseguir impregnar a espuma polimérica de maneira homogênea e ficar nas bordas da espuma polimérica sem danificar a estrutura e conservando todas as propriedades.

A composição adequada da suspensão para a impregnação da espuma polimérica pode ser avaliada mediante uma análise reológica. Nesta análise pode ser medida a viscosidade e pode se determinar se a suspensão tem um comportamento tixotrópico, comportamento desejado neste processo, através das curvas de tensão de cisalhamento contra a taxa de cisalhamento.

Outra etapa muito importante é o tratamento térmico, porque nele ocorre a degradação da espuma polimérica e a consolidação da estrutura (sinterização). Este tratamento deve ser projetado de acordo com a decomposição da espuma polimérica. Dependendo da composição e forma em que a espuma de sacrifício foi fabricada, a temperatura de degradação total dela muda.

O método da réplica apresenta vantagens na fabricação de cerâmica celular tais como: (STUDART ET AL., 2006)

- Estruturas de célula aberta
- Estruturas com alta porosidade
- Estruturas com alta permeabilidade

Também apresenta desvantagens como: (STUDART ET AL., 2006)

- Estruturas com resistência mecânica média
- Geração de gases tóxicos na extração

Método de espumação

O método da espumação consiste em espumar uma suspensão cerâmica com ajuda de um gás. Durante este processo há uma dispersão de gás em forma de bolhas em uma suspensão cerâmica. Existem duas formas de produzir a espumação: (STUDART ET AL., 2006)

- Mediante a introdução de um gás externo mecanicamente, por injeção ou por aerossol.
- Mediante a evolução de um gás *in situ*

O processo do método da espumação segue basicamente a sequência b) apresentada na Figura 7.

Tem-se um precursor cerâmico ou suspensão cerâmica, a qual é espumada por meio de um gás. Depois, o precursor previamente espumado, é submetido a um processo de secagem e posteriormente sinterizado (STUDART ET AL., 2006).

Este método permite obter cerâmicas com as seguintes vantagens: (STUDART ET AL., 2006)

- Alta porosidade
- Alta permeabilidade

Entretanto apresenta as seguintes desvantagens: (STUDART ET AL., 2006)

- Estruturas com células inicialmente fechadas
- Estruturas com resistência mecânica média

Método de sacrifício de template

Este método, como o nome sugere, consiste basicamente na incorporação de um material de sacrifício a um precursor cerâmico.

Por meio deste método se obtém uma estrutura celular que é o negativo da réplica do material de sacrifício, diferentemente do processo da réplica mencionado anteriormente.

Durante o processo, um material de sacrifício é introduzido e distribuído homogeneamente em uma suspensão cerâmica ou precursor cerâmico.

Finalmente, o precursor cerâmico com o material de sacrifício incorporado é submetido a um processo de secagem, para a posterior eliminação do material de sacrifício, seguido pela sinterização.

Os materiais naturais ou sintéticos, usados como materiais de sacrifício, são comumente extraídos por pirólise (STUDART ET AL., 2006).

2.3 Reologia

O desenvolvimento da indústria química no começo do século XX resultou numa série de materiais que apresentavam comportamentos peculiares no escoamento. Devido ao estudo desses materiais, em 1920 o professor Eugene Bingham da Universidade de Lehigh criou uma nova palavra, “Reologia”.

Reologia vem do grego, onde *reo* significa “escoamento” e *logia* significa “estudo”, então a reologia é o estudo do escoamento e da deformação dos materiais. Está restrita ao estudo entre a força e a deformação dos materiais, principalmente líquidos (MACOSKO, 1994).

Os estudos reológicos são parte fundamental na pesquisa e desenvolvimento de suspensões cerâmicas, utilizando-os no controle da consistência e comportamento delas para aplicação em diferentes processos de conformação. As suspensões cerâmicas são sistemas de um ou mais componentes altamente complexos e caracterizados geralmente de modo incompleto (MACOSKO, 1994; REED, 1998).

2.3.1 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade que caracteriza a facilidade de um fluido em escoar quando cisalhado. É associada a uma baixa viscosidade dos fluidos que escoam rapidamente, enquanto que uma alta viscosidade é associada a fluidos espessos que escoam lentamente e com maior dificuldade (DINGER, 2002).

A água é um fluido que apresenta uma viscosidade constante quando submetido a diferentes condições de cisalhamento. Todos os fluidos que apresentam viscosidade constante, como a água, são chamados de fluidos newtonianos.

Os fluidos que não exibem uma viscosidade constante quando as tensões de cisalhamento variam, são conhecidos como não-newtonianos. Misturas de fluidos imiscíveis ou misturas de múltiplas fases apresentam comportamento não-newtoniano. Exemplos deste tipo de misturas são as suspensões cerâmicas, que são misturas de pó, sol-

vente (líquido) e aditivos, resultando em suspensões que possuem mais de uma fase (DINGER, 2002).

2.3.2 Comportamento reológico de suspensões cerâmicas independentes do tempo

Existem diferentes comportamentos independentes do tempo que podem caracterizar um fluido. Esses comportamentos se encontram ilustrados na Figura 8, onde é possível observar como eles diferem do comportamento newtoniano.

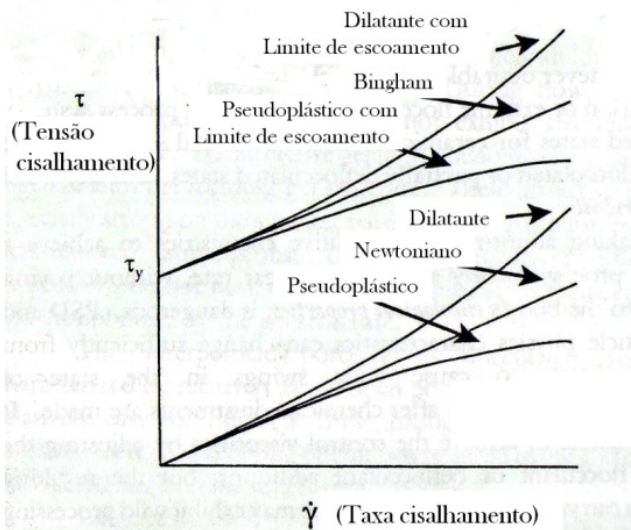


Figura 8. Diferentes comportamentos reológicos independentes do tempo (DINGER, 2002)

Pseudoplasticidade

A pseudoplasticidade se apresenta quando a viscosidade aparente de um fluido diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (DINGER, 2002). Na Figura 9 se apresenta o reograma típico de um fluido pseudoplástico.

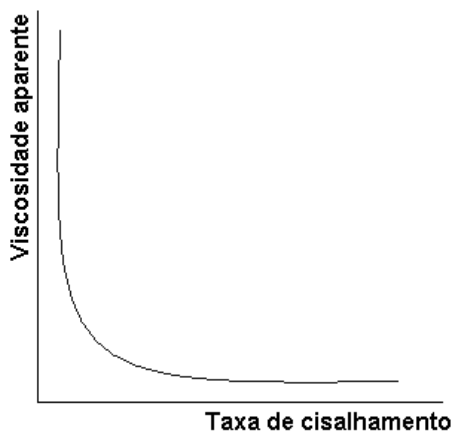


Figura 9. Reograma típico de fluidos com comportamento pseudoplástico (GOMES, 2004)

O comportamento pseudoplástico é caracterizado pela seguinte lei de potência:

$$\tau = K\gamma^n \quad (2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, K é o índice de consistência, γ é a taxa de cisalhamento e $n < 1$ é a constante que indica o desvio do comportamento newtoniano (REED, 1998).

Dilatância

A viscosidade aparente dos fluidos que apresentam comportamento dilatante aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Nos fluidos dilatantes é necessária a adição de alta tensão de cisalhamento para alcançar altas taxas de cisalhamento. Quando é aplicada uma quantidade muito grande de tensão pode acontecer que o cisalhamento e o escoamento parem. Isso é conhecido como obstrução dilatante (DINGER, 2002).

A dilatância pode ser descrita pela Equação 1:

$$\tau = K\gamma^{n-1} \quad (2)$$

onde a constante n deve ser maior que 1 (REED, 1998).

2.3.3 Comportamentos reológico de suspensões cerâmicas dependentes do tempo

Existem também comportamentos reológicos dependentes do tempo que caracterizam suspensões e fluidos não-newtonianos: a tixotropia e a reopexia. Estes dois comportamentos são apresentados na Figura 10.

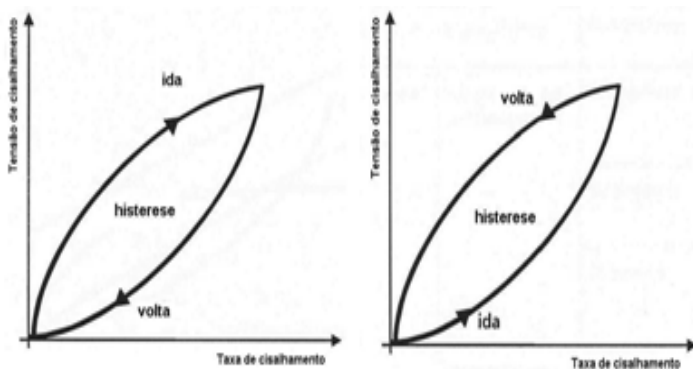


Figura 10. Comportamentos reológicos dependentes do tempo. Esquerda: Comportamento tixotrópico, direita: comportamento reopéxico (GOMES, 2004)

Tanto o comportamento tixotrópico como reopéxico se evidenciam quando no reograma, as curvas de ida e volta não coincidem entre si, apresentando uma histerese.

Tixotropia

Um fluido ou suspensão tixotrópica apresentam uma diminuição na viscosidade aparente com o tempo quando submetidos a uma tensão de cisalhamento constante (DINGER, 2002; REED, 1998). As curvas da Figura 11 representam o comportamento típico tixotrópico de um fluido medido a uma tensão de cisalhamento constante.

A tixotropia é uma propriedade qualitativa representada pela histerese existente entre as curvas de ida e volta do gráfico tensão vs. taxa de cisalhamento. É quantificada mediante um índice de tixotropia, que é determinado medindo-se a área interna das curvas.

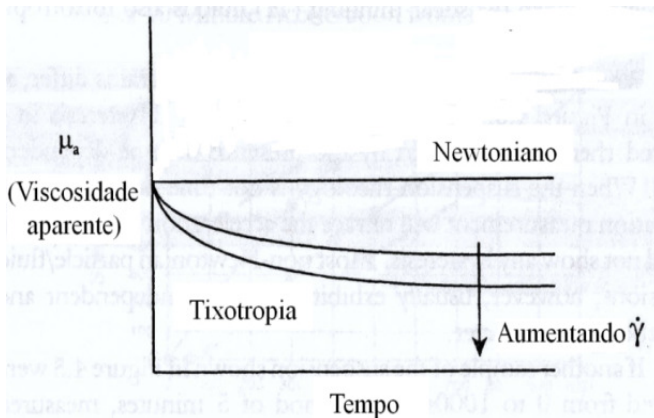


Figura 11. Reograma de um fluido tixotrópico (DINGER, 2002)

Reopexia

A reopexia é o fenômeno reológico em que a viscosidade aparente de um fluido aumenta com o tempo quando submetida a um esforço constante. Pode considerar-se como o fenômeno contrário à tixotropia. Na Figura 12 se apresenta o reograma, onde as curvas superiores representam o comportamento típico reopéxico de um fluido.

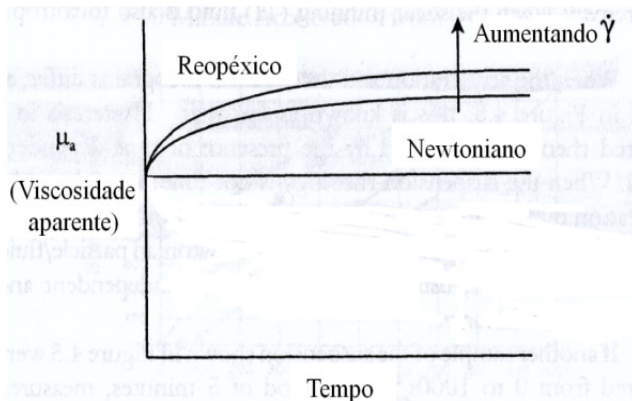


Figura 12. Reograma de um fluido reopéxico (DINGER, 2002)

2.4 Caracterização de estrutura e morfologia

2.4.1 Método de poros por polegada (PPI)

Mediante o método de poros por polegada (PPI – *pores per inches*) é possível definir a estrutura celular e o tamanho de célula, determinando o número de poros que há na distância determinada de uma polegada. Entretanto o PPI não tem sido aceito como uma unidade internacional, devido a erros de interpretação como: definição do poro, tamanho do poro, que depende do ângulo de observação, redução dimensional de 3D a 2D (a quantidade de poros é medida ao longo de uma linha em um plano em 2D) (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

2.4.2 Análise de imagem

A análise de imagem é utilizada não somente na caracterização de materiais, mas também em diferentes áreas científicas como medicina, biologia, etc. Mediante a análise de imagem é possível obter, a partir de uma imagem, uma série de informações numéricas como: (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004)

- Porosidade
- Distribuição de tamanho de poro
- Fator de forma de poros
- Número de interseções

2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é comumente utilizada no estudo ou análise de superfícies, estruturas, morfologias e formas de materiais sinterizados ou a verde. Superfícies de fratura ou seções polidas permitem o estudo do interior de uma amostra (DINGER, 2005).

As imagens topográficas obtidas são criadas a partir da detecção dos elétrons secundários emitidos pelas amostras enquanto são bombardeadas por raios de elétrons de alta energia. A análise deve ser feita em atmosfera a vácuo. Todas as amostras de materiais não condutores devem ser impregnadas com elementos ou materiais condutores antes de ser observados no microscópio.

Esta técnica de caracterização é muito importante porque permite, observar partículas, superfícies, porosidades, e inúmeros detalhes que a simples visão não são possíveis de serem observados. Mediante a microscopia eletrônica de varredura é possível obter aumentos muito maiores do que com a microscopia ótica (DINGER, 2005).

2.5 Propriedades

2.5.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das espumas têm muita importância, pois na maioria das aplicações as espumas estão sujeitas a esforços de compressão. Estas propriedades variam de acordo ao tipo de estrutura, célula fechada, parcialmente fechada ou aberta (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

Estrutura de célula aberta

Na Figura 13 se ilustra um esquema ideal da célula unitária cúbica de uma espuma de células abertas.

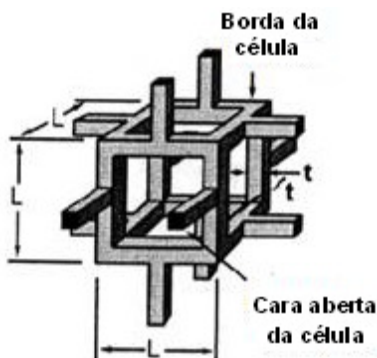


Figura 13. Célula unitária ideal (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004)

Quando uma estrutura deste tipo é submetida a um esforço, podem produzir-se três tipos de comportamentos:

- Dobramento das paredes da célula
- Deformação das paredes da célula
- Fratura das paredes da célula

Estes três tipos de comportamentos são mostrados na Figura 14.

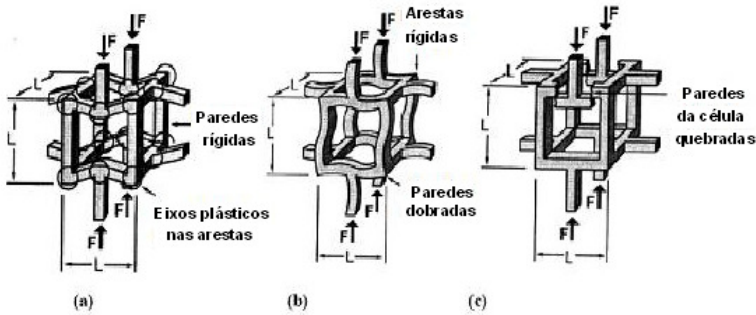


Figura 14. (a) Dobramento das paredes da célula, (b) Deformação das paredes da célula, (c) Fratura das paredes da célula (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004)

Normalmente as estruturas dúcteis colapsam por dobramento das paredes nas estruturas (a), enquanto que as espumas elastoméricas colapsam por deformação das paredes da célula (b). As espumas frágeis ou quebradiças, como no caso das espumas cerâmicas, colapsam por fratura sucessiva das paredes (c) (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

2.5.2 Densidade relativa

A densidade relativa ρ_r é uma das características mais importantes nos materiais celulares.

As propriedades das estruturas tipo colméia e das estruturas tipo espuma dependem principalmente de sua densidade relativa.

$$\rho_r = \rho^* / \rho_s \quad (2)$$

onde:

ρ^* : densidade do material celular

ρ_s : densidade do sólido

À medida que a densidade relativa se incrementa, a espessura das paredes das células aumenta e os espaços vazios diminuem (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; GIBSON, 1997).

Desta forma, a porosidade P é a fração de volume que ocupa o poro na espuma.

$$P = 1 - \rho^*/\rho_s \quad (3)$$

2.5.3 Permeabilidade

O escoamento de fluidos dentro das cerâmicas celulares é essencial em numerosas aplicações da engenharia. A eficiência de processos a alta temperatura, que envolvem filtração, mistura de fluidos, reação química e transferência de massa, dependem principalmente da permeabilidade do meio poroso utilizado. As cerâmicas celulares são dispositivos ideais para substituir meios porosos convencionais devido à sua geometria, que provê baixa queda de pressão e a capacidade de trabalhar em condições extremas (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

A permeabilidade é a medida macroscópica da facilidade com que um fluido, movido por um gradiente de pressão, escoar através de um meio poroso. Assim, a permeabilidade não é uma propriedade do fluido nem do meio poroso, mas reflete a efetividade da interação entre eles (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

Pode ser expressa mediante parâmetros derivados de duas equações principais, lei de Darcy,

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (4)$$

e a equação de Forchheimer,

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (4)$$

onde $-\frac{dP}{dx}$ é o gradiente de pressão ao longo da direção de escoamento, μ e ρ são a viscosidade absoluta e a densidade do fluido respectivamente.

te, v_s a velocidade superficial do fluido, k_1 e k_2 as permeabilidades darciana e não-darciana.

A diferença entre as duas equações é a dependência que a pressão do fluido assume quando relacionado com sua velocidade. A lei de Darcy só considera os efeitos viscosos na queda de pressão do fluido e estabelece uma dependência linear entre o gradiente de pressão e a velocidade do fluido através do meio poroso. Por sua vez, a equação de Forchheimer considera que o gradiente de pressão exibe uma tendência parabólica com um aumento na velocidade do fluido devido a contribuições de inércia e turbulência (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

2.5.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) para caracterização de materiais é utilizada para medir a mudança na massa de amostras enquanto são aquecidas e resfriadas mediante um programa de queima.

Para planejar um adequado tratamento térmico é necessário conhecer o comportamento do material com a temperatura, já que no momento da queima podem ocorrer diferentes transformações e fenômenos como decomposição, oxidação, reações entre materiais e aditivos. O equipamento que leva a cabo a TGA pesa a perda ou ganho de massa que ocorre nas reações e transformações durante a queima (DINGER, 2005).

2.6 Matérias primas

Cerâmicas tipo colméia ou tipo espuma são fabricadas de materiais refratários como zircônia, alumina, e são utilizadas como isoladores térmicos ou como filtros (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; STUART ET AL., 2006).

Os materiais cerâmicos são componentes inorgânicos cristalinos. Possuem altos pontos de fusão e alto módulo de elasticidade, devido ao tipo de ligações presentes em sua estrutura.

2.6.1 Alumina

Na indústria cerâmica, a alumina é o material químico inorgânico mais utilizado. É o principal componente para a produção de alumínio. É produzida em grandes quantidades mundialmente. A alumina

se obtém a partir de bauxita mediante a utilização do processo Bayer (RICHERSON, 1998)

2.6.2 Espumas de poliuretano

As espumas de poliuretano são um material plástico poroso. São utilizadas em diferentes aplicações, tanto domésticas como industriais. Podem ser rígidas ou flexíveis. No processo de fabricação de espumas cerâmicas pelo método da réplica são utilizadas espumas flexíveis.

Embora o processo de obtenção das espumas rígidas e flexíveis seja praticamente o mesmo, este difere pelo tipo e proporção dos reagentes.

Os componentes básicos das espumas são:

- Polioli
- Isocianato
- Água
- Catalisador
- Agentes espumantes
- Outros aditivos

As espumas podem ser de dois tipos:

- poliuretano poliéster
- poliuretano poliéter

2.7 Aplicações de Espumas Cerâmicas

As espumas cerâmicas são materiais que se caracterizam por ter propriedades como baixa condutividade térmica, baixa densidade, alta resistência ao choque térmico, alta permeabilidade, entre outras (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; BINNER, SAMBROOK).

Atualmente, estas espumas, devido a suas propriedades, têm numerosas aplicações na indústria, como queimadores porosos, filtros para motores diesel, filtros em fundição de metais e para gases a altas temperaturas. Também são utilizadas como isolantes térmicos, suportes de catalisadores e trocadores de calor (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; SARMIENTO, 2006).

As espumas cerâmicas se usam como filtros em diferentes aplicações. Uma delas são os filtros de metais, onde o metal fundido é escoado através da cerâmica.

Outra aplicação também muito importante são os suportes para catalisadores. Um exemplo são as espumas cerâmicas recobertas com platina, as quais são usadas como catalisador de exaustão de carro. Estas mesmas se utilizam como suportes de níquel e outros catalisadores usados na hidrogenação e aplicações similares.

Os processos de combustão são os que dominam os setores da energia. O dispositivo ou equipamento a utilizar depende basicamente da aplicação e do tipo de combustível. Durante a reação de combustão são gerados gases tóxicos como CO, NO_x, SO_x, os quais afetam significativamente o meio ambiente.

O gás natural vem se convertendo em uma alternativa muito eficaz na substituição de combustíveis tradicionais na geração de energia para diferentes tipos de aplicações, principalmente nos processos em que se requerem menores emissões de poluentes. Nos últimos anos as indústrias vêm apresentando um grande interesse em diminuir a poluição gerada por seus processos, procurando alternativas menos poluidoras, que proporcionem igual, ou melhor, eficiência nos seus processos. Uma alternativa muito promissora na aplicação de processos que requerem aquecimento por radiação são os queimadores porosos (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; CATAPAN, 2007).

O conceito de queimadores geradores de baixas emissões de NO_x vem se evidenciando nas últimas duas décadas, particularmente em queimadores de gás natural. Uma redução significativa nas emissões de NO_x foi conseguida no desenvolvimento de queimadores de superfície radiante porosa. Este tipo de queimador produz uma frente de chama muito próximo do suporte do queimador, que opera a alta temperatura, transferindo calor por radiação, diminuindo assim a temperatura de combustão e as emissões de NO_x. Foi alcançada uma melhora mediante o desenvolvimento de queimadores radiantes porosos, onde a chama fica completamente dentro da estrutura porosa, transferindo calor por radiação, proporcionando os mesmos benefícios que os queimadores de superfície radiante (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

Um queimador poroso é um dispositivo que está constituído por duas fases, uma sólida, que neste caso seria o meio poroso, e uma fase gasosa que seria o combustível. Dentro da fase sólida esco o com-

bustível onde acontece a reação de combustão, gerando um frente de chama que permanece dentro da estrutura porosa, transmitindo calor por radiação (PEREIRA, 2002; SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; CATAPAN, 2007).

Na Figura 15 se apresenta uma ilustração de um queimador poroso laboratorial, onde é possível observar como a chama fica dentro da estrutura porosa.



Figura 15. Queimador radiante laboratorial (PEREIRA, 2002)

Recentemente os queimadores radiantes porosos cerâmicos vêm apresentando um incremento nas aplicações domésticas e industriais, principalmente as que utilizam combustão de gás natural. As cerâmicas celulares oferecem uma boa alternativa, por sua operação em altas temperaturas e a sua eficiente extração de calor através da superfície porosa radiante (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

CAPITULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois tipos de espumas de poliuretano poliéter (Foam Partner, Fritz & Nauer AG, Alemanha) de porosidade aberta (ver Figura 16). As características fornecidas pelo fabricante se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1. Características das Espumas Poliuretano

| Característica | Espuma A | Espuma B |
|---|----------|----------|
| Densidade linear de poros PPI (<i>pores per inch</i>) | 10 | 20 |
| Densidade (kg/m ³) | 25 | 25 |
| Alongamento no ponto de ruptura (%) | >100 | >90 |
| Fluxo de ar (l/m ² s) | 4500 | 4000 |

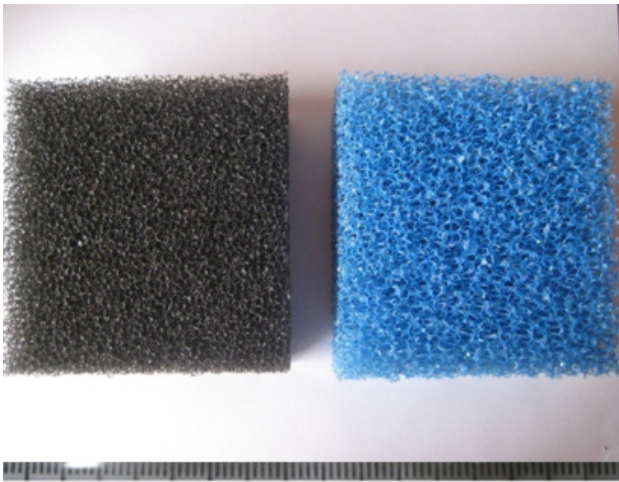


Figura 16. Espumas de poliuretano utilizadas no processo da replica (Foam Partner, Fritz & Nauer AG, Alemanha)

O material cerâmico utilizado foi a alumina (Al₂O₃) calcinada (Alcoa, Brasil) com as características fornecidas pelo fabricante apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Análise Química da Alumina (Al_2O_3)

| | |
|---|------|
| Al_2O_3 (%) | 98,5 |
| SiO_2 (%) | 0,02 |
| Fe_2O_3 (%) | 0,03 |
| Na_2O (%) | 0,5 |
| Umidade (300°C) (%) | 0,5 |
| Perda ao fogo (300–1000 °C) (%) | 0,5 |

Tabela 3. Análise Física da Alumina (Al_2O_3)

| | |
|---|-----|
| Densidade solta (g/cm^3) | 1,0 |
| Densidade compactada (g/cm^3) | 1,2 |
| Área superficial (m^2/g) | 60 |

Para a preparação da suspensão de alumina, também foram utilizados outros componentes. Como meio dispersante (solvente) foi utilizado água destilada. Também foram utilizados aditivos como acetato de polivinila (PVA), polímero acrílico aquoso 35% em peso (WB4101, Polymer Innovations, EUA), que fazem a função de ligante, ajudando na coesão das partículas e a aderência da suspensão cerâmica nas paredes da espuma polimérica, e melhorando as propriedades da cerâmica durante e após a sinterização. Silicato de sódio e polimetacrilato de amônio (DARVAN C-N, R.T. Vanderbilt Company, Inc.) foram utilizados como dispersantes, os quais ajudam a estabilização da suspensão, evitando a formação de aglomerados de pó.

3.2 Planejamento experimental

Para avaliar os diferentes fatores que podem ter influência nas propriedades da suspensão de alumina (Al_2O_3), foi realizado um planejamento fatorial completo 2^4 (BARROS NETO, 1995), no qual foram variados a porcentagem de sólidos na suspensão, a concentração do ligante e do dispersante e o tipo de dispersante.

Nas Tabelas 4 e 5 se apresentam os fatores e os níveis, assim como o esquema do planejamento com os valores codificados e não codificados.

Tabela 4. Fatores e níveis planejamento fatorial completo 2⁴.

| Fator | Nível | |
|--------------------------------|--|--|
| | -1 | +1 |
| 1- Concentração de dispersante | 1% | 2% |
| 2- Concentração de ligante | 5% | 10% |
| 3- Porcentagem de sólidos | 50% | 60% |
| 4-Tipo de dispersante | Silicato de sódio (Na ₂ O/SiO ₂) | Poli-metacrilato de amônio (Darvan C-N) |

Tabela 5. Planejamento fatorial 2⁴.

| En-saio | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|---------|----------|----------|---|
| 1 | (-1) 1% | (-1) 5% | (-1) 50% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 2 | (+1) 2% | (-1) 5% | (-1) 50% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 3 | (-1) 1% | (+1) 10% | (-1) 50% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 4 | (+1) 2% | (+1) 10% | (-1) 50% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 5 | (-1) 1% | (-1) 5% | (+1) 60% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 6 | (+1) 2% | (-1) 5% | (+1) 60% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 7 | (-1) 1% | (+1) 10% | (+1) 60% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 8 | (+1) 2% | (+1) 10% | (+1) 60% | (-1) Na ₂ O/SiO ₂ |
| 9 | (-1) 1% | (-1) 5% | (-1) 50% | (+1) Darvan C-N |
| 10 | (+1) 2% | (-1) 5% | (-1) 50% | (+1) Darvan C-N |
| 11 | (-1) 1% | (+1) 10% | (-1) 50% | (+1) Darvan C-N |
| 12 | (+1) 2% | (+1) 10% | (-1) 50% | (+1) Darvan C-N |
| 13 | (-1) 1% | (-1) 5% | (+1) 60% | (+1) Darvan C-N |
| 14 | (+1) 2% | (-1) 5% | (+1) 60% | (+1) Darvan C-N |
| 15 | (-1) 1% | (+1) 10% | (+1) 60% | (+1) Darvan C-N |
| 16 | (+1) 2% | (+1) 10% | (+1) 60% | (+1) Darvan C-N |

Com o objetivo de observar o comportamento reológico e obter uma adequada composição da suspensão de alumina, além de uma boa impregnação das espumas, foi medida como variável de resposta o comportamento tixotrópico para cada ensaio. A tixotropia é uma propriedade desejável nas suspensões cerâmicas utilizadas para este tipo de processo, já que ela permite que a suspensão possa aderir-se às paredes da espuma polimérica, sem que ocorra perda de suspensão em excesso.

3.3 Preparação das misturas cerâmicas

As suspensões foram preparadas em um moinho de bolas CT 242 (Servitech, Brasil). Utilizou-se um recipiente com um conteúdo de 300 g de bolas de alumina de diferentes tamanhos. Foram misturados em total 50 g de componentes (alumina, água, ligante e dispersante) por 10 min, tempo suficiente para a homogeneização da suspensão, a uma velocidade de 1720 rpm.

3.3.1 Distribuição de tamanho de partícula

Utilizaram-se peneiras desde malha com abertura 300 μm até 45 μm , dispostas em ordem decrescente. O material foi posto na parte superior do arranjo de peneiras e com a ajuda de um agitador mecânico foi passado através das aberturas das peneiras. A agitação foi realizada durante um período de 20 min.

3.4 Reologia

Foi analisada a reologia através de um viscosímetro rotacional com geometria de cilindros concêntricos, (modelo System/52p Rheomex, Haake, Alemanha) a uma taxa de cisalhamento de 1 a 500 s^{-1} . Determinou-se a tixotropia e a viscosidade das diferentes suspensões (diferentes composições, planejamento experimental) analisadas através da curva tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento (DINGER, 2002; MACOSKO, 1994; XINWEN ET AL., 2002). A análise permite determinar qual é a composição de suspensão mais adequada para a impregnação da espuma de poliuretano.

3.5 Implementação do método da réplica

3.5.1 Suspensão de alumina

A suspensão de alumina foi preparada de acordo ao procedimento mencionado. Depois da homogeneização, a suspensão foi retirada do moinho e colocada em um recipiente para a posterior impregnação da espuma.

3.5.2 Impregnação e secagem das espumas

As espumas de poliuretano foram impregnadas com a suspensão de alumina. A impregnação foi realizada manualmente, submergindo cada uma das amostras na suspensão. Amostras de espuma de 2,5x2,5x2,5 cm foram cortadas. O processo de impregnação foi repetido 3 vezes para cada amostra, com o fim de garantir que todas as paredes da espuma polimérica ficassem recobertas pela suspensão. Após a terceira impregnação, as amostras foram secadas a temperatura ambiente por 24 h (SARMIENTO, 2006; SOUSA, 2005).

3.5.3 Tratamento térmico

As amostras secas foram submetidas a um tratamento térmico para a degradação térmica do poliuretano e posterior sinterização do material cerâmico.

Com o objetivo de obter uma completa degradação do poliuretano, procurando manter a estrutura cerâmica, é necessário conhecer o comportamento térmico da espuma. Para isso foi avaliada, mediante estudos preliminares, a decomposição térmica das espumas de poliuretano. A Figura 17 apresenta a análise termogravimétrica (TGA) de uma espuma de poliuretano típica.

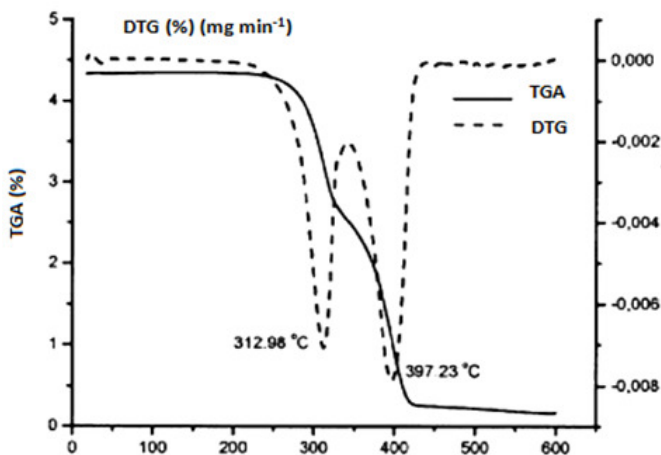


Figura 17. Análise termogravimétrica, curvas TGA e DTG (SOUSA, 2005)

O tratamento térmico foi planejado tendo em conta a temperatura de degradação total do poliuretano. Na análise termogravimétrica apresentada na Figura 17, pode-se observar que a degradação do poliuretano se encontra em uma faixa de 300 a 400°C. Nesta faixa de temperatura, SOUSA et al. (2005) determinaram que os produtos de decomposição do poliuretano são CO_2 , CO e NH_3 principalmente. A partir daí foi definida a primeira etapa do ciclo térmico, o qual está ilustrado na Figura 18.

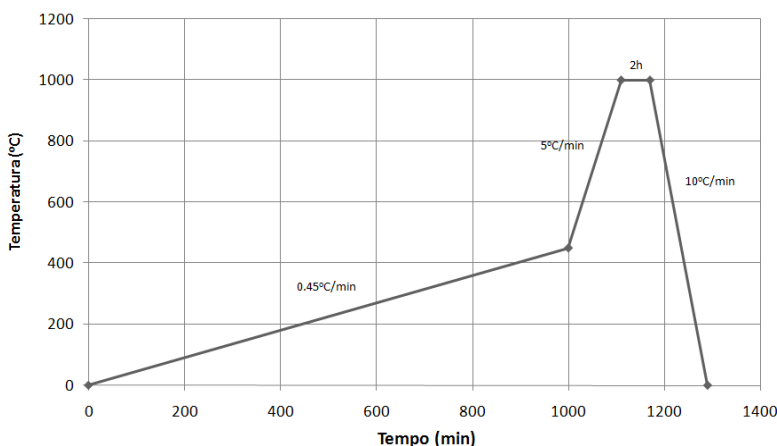


Figura 18. Degradação térmica do poliuretano e pré-sinterização

Com o objetivo de evitar que a estrutura colapse após a degradação térmica do poliuretano, seguindo testes iniciais em diferentes taxas, escolheu-se uma taxa de aquecimento de 0,45°C/min até 450°C, para se garantir a degradação total da espuma. A taxa de 0,45°C/min garante que o poliuretano seja degradado lentamente sem danificar a estrutura celular. A partir dos 450°C, a taxa de aquecimento se incrementou a 5°C/min até alcançar a temperatura de 1000°C, máxima temperatura possível para trabalhar no forno. A 1000°C, as espumas foram deixadas por 2 h e posteriormente resfriadas a uma taxa de 10°C/min.

O ciclo térmico foi realizado em duas e três etapas, dependendo da temperatura de sinterização. As temperaturas de sinterização foram 1500°C, 1550°C e 1600°C.

Após a primeira etapa, as espumas foram retiradas do primeiro forno cuidadosamente e postas no segundo forno para poder sinterizá-las até 1500°C, temperatura máxima em que trabalha o segundo forno. A sinterização a 1550°C e 1600°C foi realizada em uma terceira etapa em um outro forno que consegue chegar até essas temperaturas. Na segunda e terceira etapa do ciclo térmico, a taxa de aquecimento foi de 10°C/min, e ao alcançar a temperatura de sinterização desejada, as espumas são deixadas por um período de 2 h e posteriormente resfriadas. O ciclo da etapa 2 e 3 se apresenta na Figura 19.

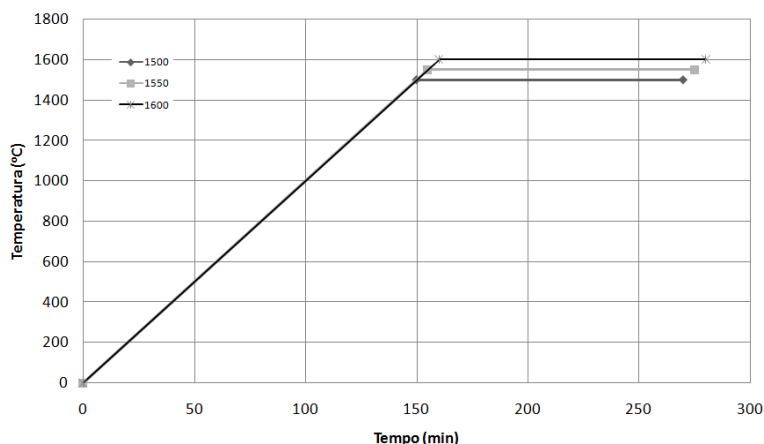


Figura 19. Sinterização a 1500°C, 1550°C e 1600°C

3.6 Caracterização espumas cerâmicas

3.6.1 Morfologia e microestrutura

Através de microscopia eletrônica de varredura (MEV, Philips XL 30, Holanda) foram obtidas imagens das amostras sinterizadas nas diferentes temperaturas e de uma amostra impregnada (com suspensão de alumina, sem sinterizar) com aumentos 17×, 30×, 500× e 4000×. As amostras foram recobertas com ouro e a energia do canhão foi de 30 kV. Mediante MEV é possível analisar a morfologia da estrutura celular cerâmica e também a densificação do material com a temperatura (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; DINGER, 2005).

3.6.2 Resistência mecânica

Através de uma máquina de ensaios universais (Emic DL2000, Brasil) foi medida a resistência mecânica das amostras submetidas a diferentes temperaturas de sinterização (1500, 1550, 1600 °C). O ensaio permite comparar a resistência das amostras sinterizadas às diferentes temperaturas e determinar sua resistência máxima (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004).

3.6.3 Resistência mecânica à alta temperatura

Mediante testes de flexão a 800°C foi medida a resistência mecânica a alta temperatura das amostras sinterizadas a 1600°C. Amostras de 3,5x2x2 cm foram preparadas. O teste foi realizado num equipamento de materiais (Z2.5/TS1S-2004, Zwick/Roell) com forno adaptado, com uma velocidade de carregamento de (1 mm/min). Mediante este ensaio foi avaliada a resistência mecânica das espumas de alumina a alta temperatura, importante para aplicação como queimadores porosos radiantes. Os testes foram realizados no laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Rio Grande do Norte.

3.6.4 Densidade relativa e porosidade

A densidade relativa (SCHEFFLER, COLOMBO, 2004; GIBSON, 1997) das espumas de poliuretano é alumina foi calculada pela Equação 3.

Para a espuma de poliuretano, a densidade relativa foi calculada a partir dos dados de densidade geométrica fornecidos pelo fabricante (ρ^*) e da densidade do material sólido (ρ_s) medido por picnometria ao hélio (YONG-SHENG ET AL., 2002).

No caso das espumas de alumina, a densidade relativa foi medida assumindo a densidade do material sólido (ρ_s) como a densidade do material puro, e a densidade geométrica (ρ^*) foi determinada para cada uma das amostras (espumas de alumina sinterizadas), pesando e medindo o volume de cada uma delas.

3.6.5 Porcentagem de retração volumétrica

A porcentagem de retração volumétrica é a medida da quantidade de volume que a espuma cerâmica se reduz após se submetida ao tratamento térmico. Essa porcentagem se determina medindo as dimensões da espuma antes (espuma polimérica) e após o tratamento térmico e comparando-as. Para cada amostra foram medidas as dimensões com um micrômetro (Mitutoyo 530, Japão).

3.6.6 Permeabilidade

A permeabilidade das espumas de poliuretano e das réplicas foi avaliada através de medidas de queda de pressão em função da velocidade de fluxo de N_2 nas amostras. Os resultados foram obtidos a temperatura ambiente ($\sim 25^\circ C$). Um transdutor de pressão (Omega PX137-015AV, EUA) foi utilizado para a determinação da pressão e um fluxômetro (Omega FMA-1720, EUA) foi utilizado para determinação da vazão do gás.

3.6.7 Análise de imagem

Mediante a análise de imagens foram determinados parâmetros morfométricos como porosidade e distribuição de tamanho de poros. Corpos de prova sinterizados a $1600^\circ C$ foram embutidos a vácuo com resina poliéster, secados durante 24 h e posteriormente lixados e polidos. Após o polimento, as amostras foram analisadas no estereoscópio com aumento de 10 \times , obtendo imagens que depois foram transformadas em escala de cinza e binarizadas utilizando-se o software Imago[®] desenvolvido no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.7 Testes nos queimadores radiantes

O queimador construído teve como objetivo receber injeções de ar e combustível, e permitir que a cerâmica a ser estudada pudesse ser queimada, sem risco de um retorno de chama ou aquecimento excessivo que danificasse a tubulação e/ou a estrutura. Foi utilizado um cilindro de aço vedado na parte inferior por um anel de PVC conectado à tubulação. Acima do anel, foram postas bolas de alumina, para impedir que um

possível retorno de chama pudesse fundir a tubulação. A cerâmica foi presa na extremidade superior do cilindro, concêntrica ao mesmo, comprimida em todo o seu perímetro por lâ de alumina, material isolante, como ilustra a Figura 20.

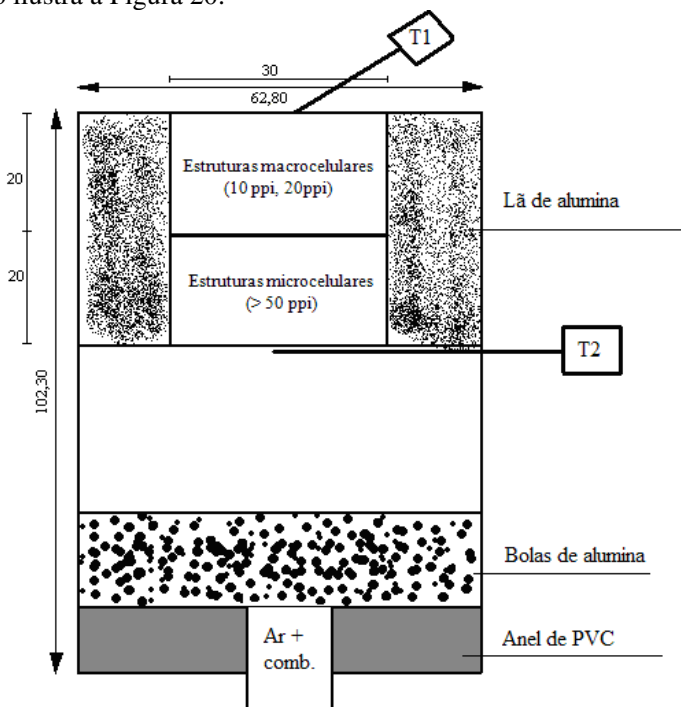


Figura 20. Esquema do queimador poroso radiante utilizado para os testes das cerâmicas celulares de alumina

T_1 e T_2 são termopares usados para medir a temperatura na superfície e no fundo da cerâmica, respectivamente. A medição T_2 é importante para detectar o retorno da chama. Quando esta se torna maior que aproximadamente 1000°C , é sinal que está havendo um retorno de chama. A temperatura T_1 é usada para determinar a eficiência de radiação. A temperatura máxima do queimador ocorre na posição da chama que se mistura próximo à interface entre as cerâmicas micro e macroporosas. Esta temperatura de chama pode ser de 300 a 400°C mais alta que a temperatura superficial T_1 .

Os testes consistiram em, ao fixar certa razão de equivalência (proporção entre ar e combustível), determinar as vazões que mantêm a frente de chama no interior da cerâmica.

CAPITULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise estatística

Para avaliar a influência dos fatores do planejamento sobre o comportamento tixotrópico da suspensão, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos no comportamento reológico das suspensões (software Statistica 6.0). A Tabela 2 apresenta a análise de variância com um nível de confiança de 95% e a Figura 21, os resultados dos efeitos representados em um gráfico de Pareto.

Tabela 6. Análise de variância para o comportamento tixotrópico da suspensão

| Factor | SS | df | MS | F | p |
|----------------------|----------|----|---------|----------|----------|
| (1)% dispersante | 83336 | 1 | 83336 | 0.28516 | 0.616219 |
| (2)[] PVA - ligante | 1724506 | 1 | 1724506 | 5.90090 | 0.059441 |
| (3)% solidos | 797727 | 1 | 797727 | 2.72966 | 0.159410 |
| (4)tipo dispersante | 2922986 | 1 | 2922986 | 10.00185 | 0.025023 |
| 1 by 2 | 1371875 | 1 | 1371875 | 4.69427 | 0.082494 |
| 1 by 3 | 43718 | 1 | 43718 | 0.14960 | 0.714836 |
| 1 by 4 | 372760 | 1 | 372760 | 1.27551 | 0.309968 |
| 2 by 3 | 296692 | 1 | 296692 | 1.01522 | 0.359900 |
| 2 by 4 | 1231602 | 1 | 1231602 | 4.21429 | 0.095294 |
| 3 by 4 | 1272439 | 1 | 1272439 | 4.35402 | 0.091290 |
| Error | 1461222 | 5 | 292244 | | |
| Total SS | 11578863 | 15 | | | |

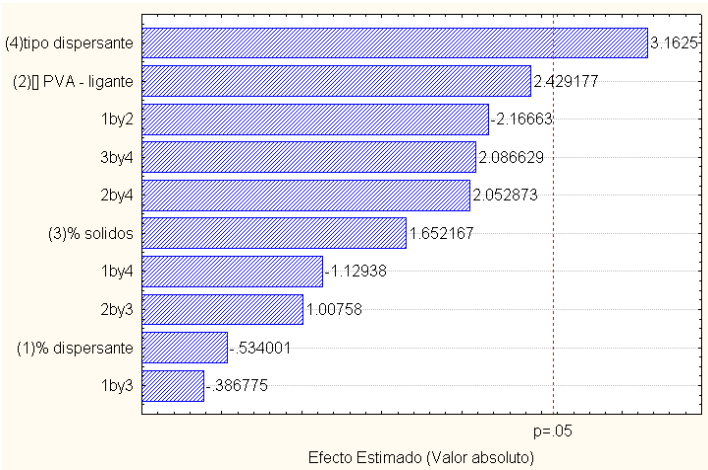


Figura 21. Gráfico de Pareto dos resultados dos efeitos

Dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 6, pode-se observar que o fator 4 (tipo de dispersante) foi o mais significativo no comportamento tixotrópico das suspensões. Assim, o valor de p é menor do que 0,05 para o fator 4, enquanto que para os outros três fatores (% dispersante, % ligante e % sólidos) e para as interações entre os fatores, o valor de p está acima de 0,05 (BARROS NETO ET AL., 1995).

4.2 Reologia

A preparação das primeiras suspensões permitiu observar que o tamanho de partícula da alumina era muito grande, pois não foi possível preparar suspensões com uma porcentagem de sólidos maior do que 45% em peso. A suspensão apresentou um comportamento muito viscoso, sem fluência, não sendo possível penetrar na estrutura polimérica no momento da impregnação manual, de modo efetivo. Nesses casos, no momento da degradação térmica do poliuretano, nenhuma das estruturas resistiu a essa etapa do tratamento térmico, colapsando completamente.

Na Figura 22 se mostra uma fotografia das espumas impregnadas após a primeira etapa do tratamento térmico (degradação térmica do poliuretano), na qual é possível observar que nenhuma das amostras resistiu à primeira etapa do tratamento térmico.



Figura 22. Imagem das amostras após da primeira etapa do tratamento térmico

Segundo SCHEFFLER & COLOMBO (2004) uma suspensão cerâmica para a fabricação de componentes celulares deve conter entre

50 e 70% em peso de sólidos. Para conseguir aumentar esse conteúdo de sólidos na suspensão, foi realizada uma redução do tamanho de partícula do pó de alumina (YONG-SHEHG ET AL., 2002). A alumina foi moída a seco por 72 h em um moinho de bolas (FLORES, NEVES, 1997).

Para comprovar a redução do tamanho de partícula foi realizada uma análise granulométrica, comparada com a análise antes da moagem (fornecida pelo fabricante, Alcoa). Estas análises granulométricas se apresentam na Figura 23 e 24.

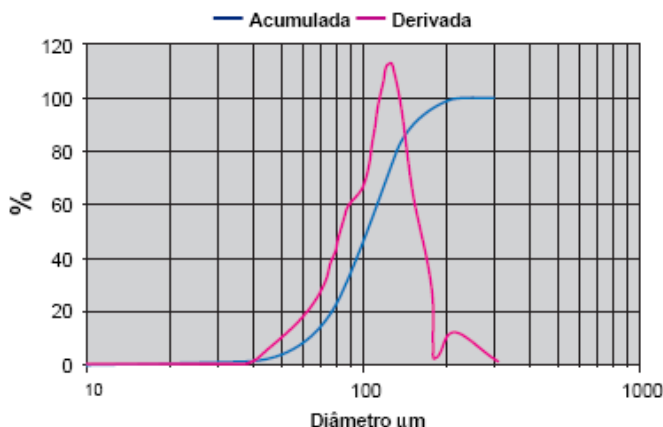


Figura 23. Distribuição de tamanho de partícula antes da moagem

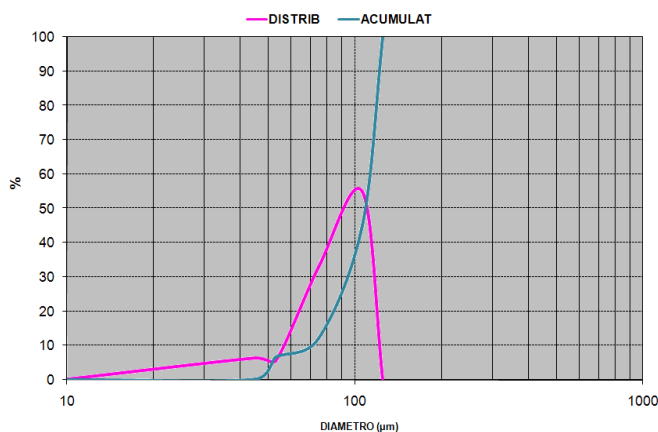


Figura 24. Distribuição de tamanho de partícula após a moagem

Nos gráficos de distribuição de tamanho de partícula se observa, embora não seja muito evidente, que houve uma redução de cerca de 30% no tamanho das partículas reportado pelo fabricante. A redução de tamanho permitiu a preparação de suspensões com conteúdo de sólidos maior do que 45%, devido à maior dispersão das partículas.

Os resultados obtidos na reologia das suspensões mostraram que quase todas apresentam um comportamento tixotrópico (DINGER, 2002; DINGER, 2005), destacadamente em 4 das suspensões (ver Figura 25). A tixotropia se evidencia na histerese existente entre as curvas de ida e volta do gráfico de tensão de cisalhamento *vs.* taxa de cisalhamento. Foi possível avaliar esta propriedade quantitativamente mediante o software Reowin.

A Figura 25 apresenta um gráfico comparativo dos resultados da tixotropia para as diferentes suspensões. A numeração das suspensões no gráfico foi feita de acordo com o planejamento experimental apresentado no Capítulo 3: Materiais e Métodos.

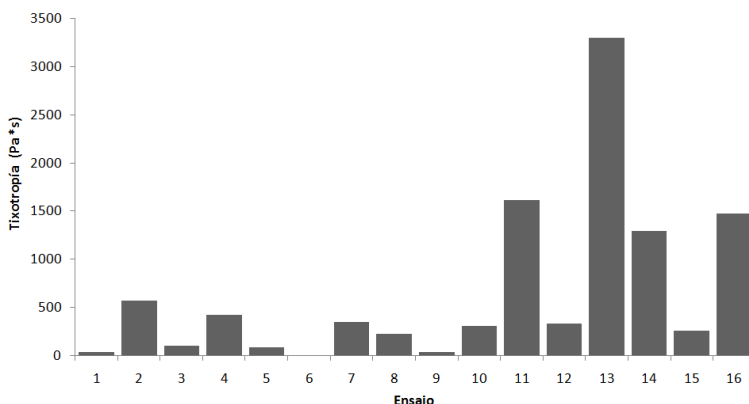


Figura 25. Tixotropia calculada das diferentes suspensões

Também se observou que as suspensões com dispersante silicato de sódio apresentaram uma viscosidade muito maior (ver Figura 26 e 27) o que dificultou a impregnação, não conseguindo penetrar na espuma completamente. Esse comportamento é devido à não dispersão das partículas. No momento da impregnação, as paredes da espuma permaneciam sem nenhum recobrimento.

Na Figura 26 e 27 se mostram as curvas (tensão vs. taxa de cisalhamento) para as suspensões com igual composição (60% sólidos, 1% dispersante, 5% e 10% ligante variando o tipo de dispersante (silicato de sódio e polimetacrilato de amônio).

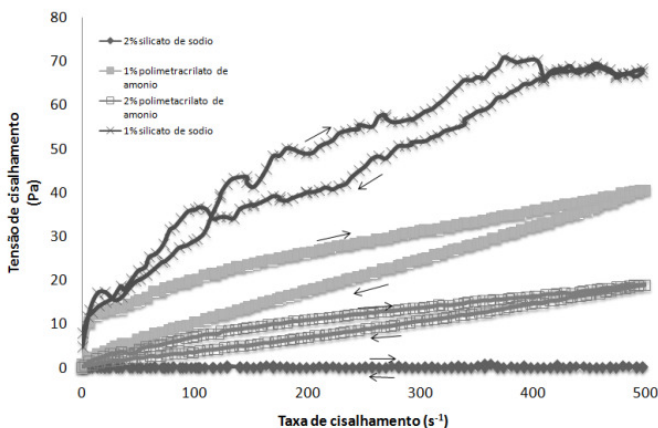


Figura 26. Tensão vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 5% ligante, 1% e 2% dispersante (silicato de sódio e polimetacrilato de amônio))

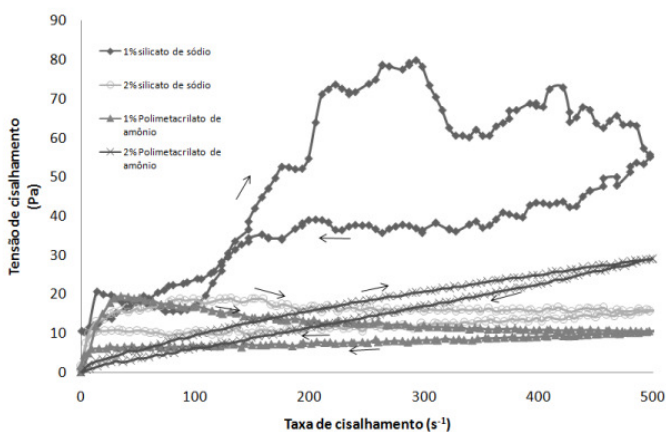


Figura 27. Tensão vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 10% ligante, 1% e 2% dispersante (silicato de sódio e polimetacrilato de amônio))

Observa-se que as suspensões com silicato de sódio apresentam uma maior viscosidade, enquanto que as suspensões com polimetacrilato de amônio apresentaram um comportamento reológico mais adequado, com uma menor viscosidade, que possibilitou uma boa impregnação da espuma polimérica.

A suspensão com conteúdo de sólidos de 60%, 5% PVA como ligante, 1% polimetacrilato de amônio como dispersante e 34% de água como solvente mostrou um comportamento tixotrópico maior com uma viscosidade aparente apropriada para a penetração e posterior permanência nas paredes da espuma, conseguindo uma melhor impregnação.

Com a composição da suspensão escolhida (60% sólidos, 5% ligante (PVA), 1% dispersante (polimetacrilato de amônio), foi testado o acrílico como ligante substituindo o PVA.

Na Figura 28 se mostra o comportamento reológico das suspensões com o PVA e o acrílico como ligante.

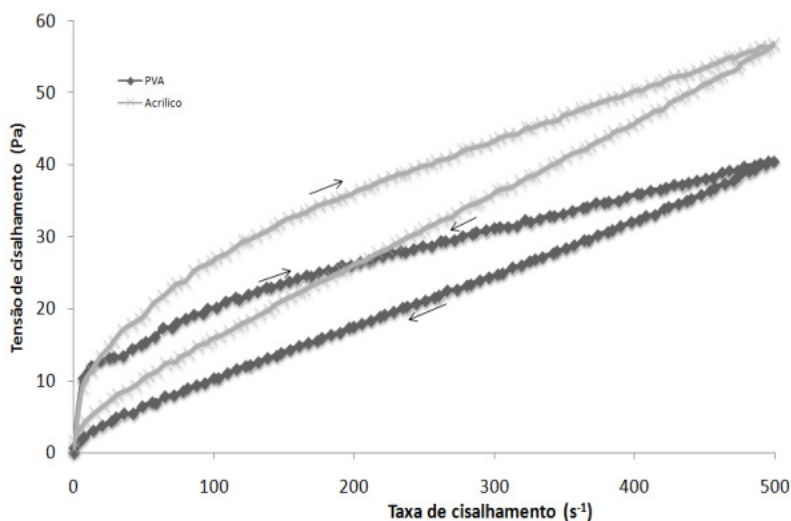


Figura 28. Tensão vs. taxa de cisalhamento para a suspensão com ligante PVA e acrílico

Observa-se que as duas suspensões apresentam um comportamento similar, mas a suspensão com ligante acrílico apresentou uma viscosidade mais apropriada (ligeiramente maior que a da suspensão com ligante PVA, mas significativamente menor que a das suspensões

com dispersante silicato de sódio, ver Figura 29), o que ajudou a suspensão a recobrir melhor e permanecer nas paredes das espumas. As amostras ficaram mais bem impregnadas com a suspensão de ligante acrílico do que com a suspensão de PVA.

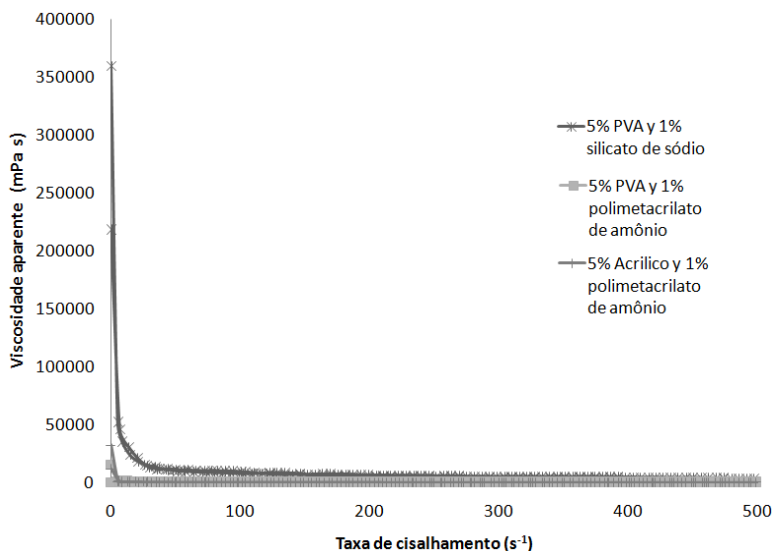


Figura 29. Viscosidade vs. taxa de cisalhamento (60% sólidos, 5% ligante (PVA e acrílico), 1% dispersante (silicato de sódio e polimetacrilato de amônio))

Foi escolhida a suspensão com ligante acrílico porque todas as amostras após a etapa 1 do tratamento térmico apresentaram melhor estrutura e nenhuma colapsou. Na Figura 30 se apresenta uma imagem das amostras após a etapa 1.

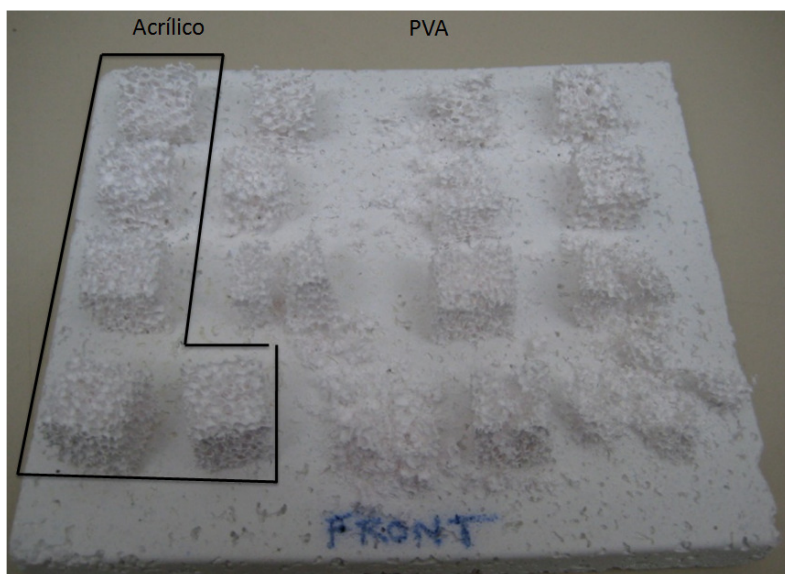


Figura 30. Imagem comparativa das amostras com ligante acrílico e PVA após a degradação térmica do polímero

Na Figura 30 se observa que houve amostras que ficaram com a estrutura completa, enquanto outras apresentam só parte da estrutura ou inclusive colapsaram completamente após a etapa 1 do tratamento térmico. As amostras que conservaram a estrutura são as impregnadas com a suspensão de ligante acrílico, enquanto que as que estão completamente destruídas são as impregnadas com o sistema que contém PVA.

4.3 Caracterização das espumas cerâmicas

4.3.1 Resistência mecânica

Na Figura 31 se mostra o gráfico comparativo da resistência mecânica a temperatura ambiente das amostras obtidas na réplica da espuma A (10 ppi) e da espuma B (20 ppi) sinterizadas a 1500°C, 1550°C e 1600°C. Foram medidas duas amostras para cada tipo de espuma (réplica).

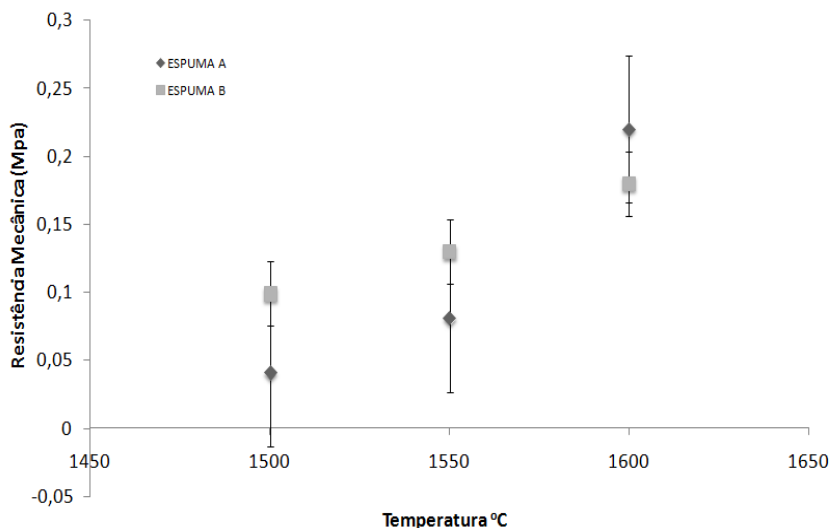


Figura 31. Gráfico comparativo da resistência mecânica em função da temperatura de sinterização das espumas de alumina

Embora o número de amostras testadas (3 para cada temperatura) não seja representativo, observou-se que os dois tipos de espumas tiveram um comportamento similar, apresentado um aumento na resistência mecânica com a temperatura de sinterização.

A estrutura que apresentou maior resistência foi a espuma de células maiores (réplica da espuma A, 10 ppi) sinterizada a 1600°C. Este resultado pode ser atribuído à maior espessura das paredes da espuma A (células maiores) em relação à espuma do tipo B. Isso pode ser evidenciado nas micrografias apresentadas na Figura 33.

Observou-se também que as estruturas com melhor resistência mecânica nas amostras sinterizadas a 1500°C e 1550°C foram as réplicas da espuma B (20 ppi), enquanto que a que apresentou melhor resistência na temperatura de sinterização de 1600°C foi a réplica da espuma A. A maior resistência mecânica foi de 0,22 MPa. Os valores da resistência à compressão quando comparados com resultados em pesquisas prévias são baixos. No estudo de YONG-SHENG et al. (2001) a resistência mecânica das espumas sinterizadas a temperaturas de 1500, 1550 e 1600°C foi de aproximadamente 0,65; 1,32 e 1,3 MPa respectivamente.

Comprovou-se que o aumento da resistência mecânica com a temperatura de sinterização está diretamente relacionado com a densificação do material, neste caso da alumina (YOUNG-SHENG ET AL., 2002). No caso deste trabalho, com uma maior densificação, a estrutura se tornou mais resistente.

4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 32 é possível observar a influência da temperatura na densificação da estrutura.

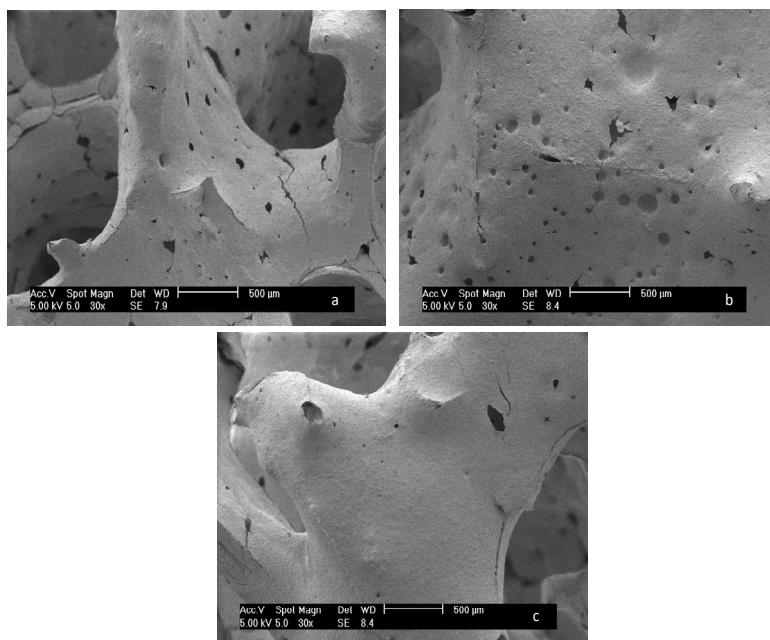


Figura 32. Micrografias MEV de amostras sinterizadas a 1500°C (a), 1550°C (b) e 1600°C (c)

Observa-se que nas temperaturas de 1500°C e 1550°C não há diferença significativa. As duas estruturas (a e b) apresentam uma grande quantidade de microporos (~74 a 1500°C e ~77 a 1550°C), enquanto que na temperatura de 1600°C (c) se observa uma estrutura mais densificada com uma diminuição da quantidade de microporos de aproximadamente 68%.

A melhor densificação na temperatura de 1600°C tem como resultado um aumento na resistência mecânica. Isso se comprovou com o ensaio de resistência apresentado anteriormente.

Na Figura 33 se apresentam as micrografias das espumas sinterizadas a 1600°C tomadas com estereoscópio, com aumento de 50× e 100×, onde é possível observar células parcialmente fechadas, resultado do processo da réplica.

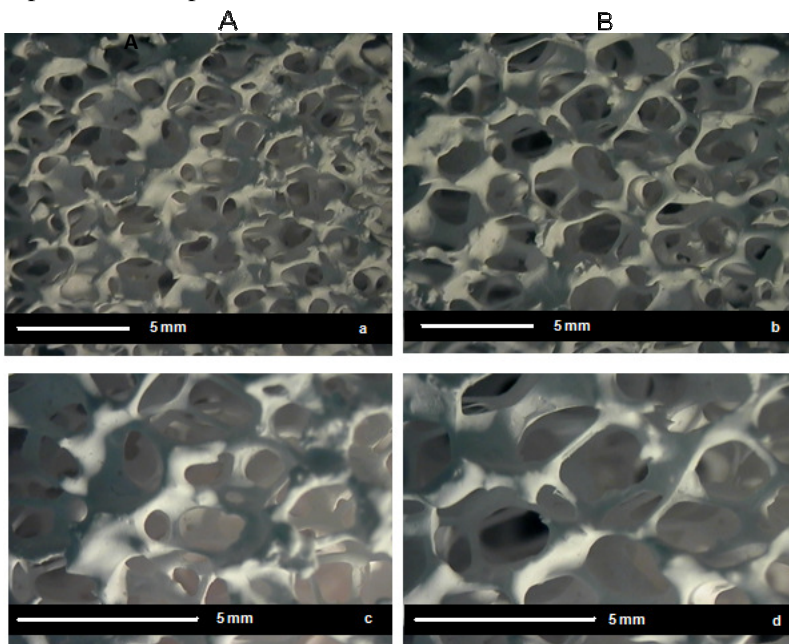


Figura 33. Micrografias das espumas sinterizadas 1600°C, (a e c) aumento 50× espuma A e B respectivamente (c e d) aumento 100× espuma A e B respectivamente

Na Figura 33 se observa que as paredes das células da espuma cerâmica ficaram muito mais grossas do que as paredes das células da espuma de poliuretano. Isso mostra que a impregnação das espumas foi homogênea, embora as espumas de alumina ainda apresentem algumas células fechadas, aproximadamente 22% no caso da espuma A e 18% na espuma B. A estimativa da quantidade de células fechadas foi feita sobre as micrografias apresentadas na Figura 33 mediante uma contagem ma-

nual relacionando a quantidade de células totais e a quantidade de células fechadas.

As paredes de célula grossas ajudam que a estrutura celular apresente uma maior resistência mecânica, mas diminuem a porosidade, consequência indesejável, já que a alta porosidade é uma das características mais importantes das estruturas celulares quando utilizadas em queimadores radiantes.

4.3.3 Análise de imagem

Com o objetivo de calcular a distribuição de tamanho de poro e a porosidade das amostras, foram modificadas e analisadas imagens das espumas cerâmicas A e B. Na Figura 34 se apresentam as imagens binarizadas da espuma A, das quais foi obtida a distribuição de tamanho de poro e a porosidade apresentadas na Figura 35 e a Tabela 7 respectivamente.

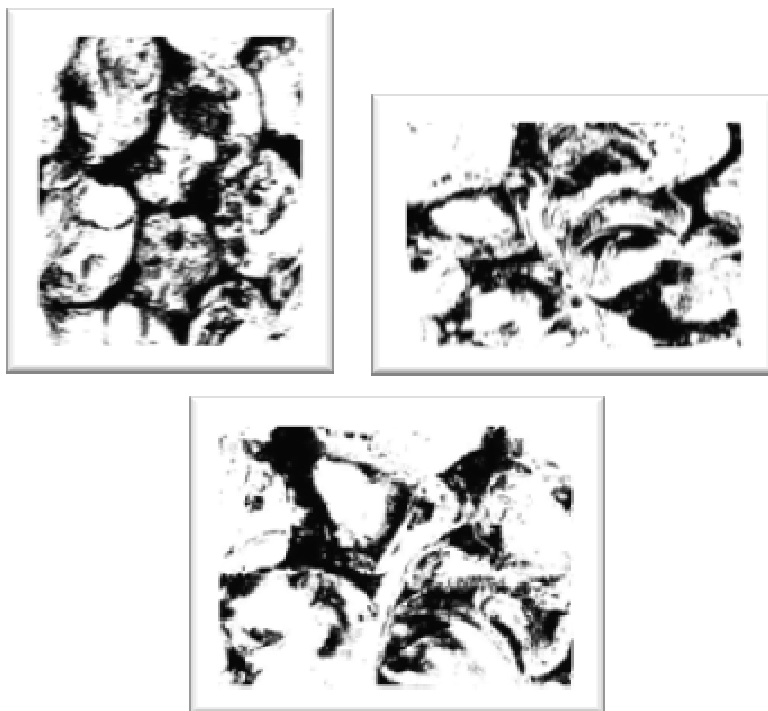


Figura 34. Imagens binarizadas de espumas cerâmicas A

É possível observar que as amostras apresentam tamanhos diferentes de poro, apresentados na Figura 36.

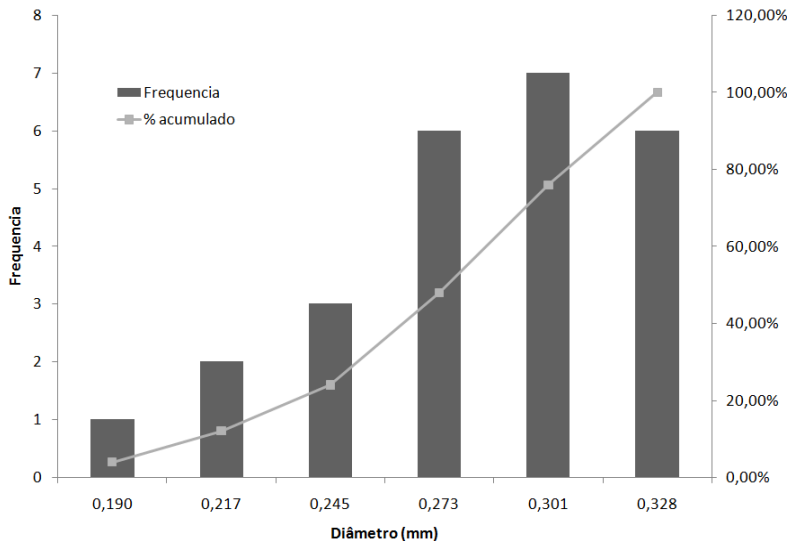


Figura 35. Distribuição de tamanho de poro das espumas cerâmicas A

O perfil de variação do tamanho de poro não se comporta como uma distribuição normal, o que significa que não existe um tamanho único de poro, o que implica na impossibilidade de prever o tamanho dos poros de amostras futuras.

Na Figura 36 se mostram as imagens modificadas da espumas B.

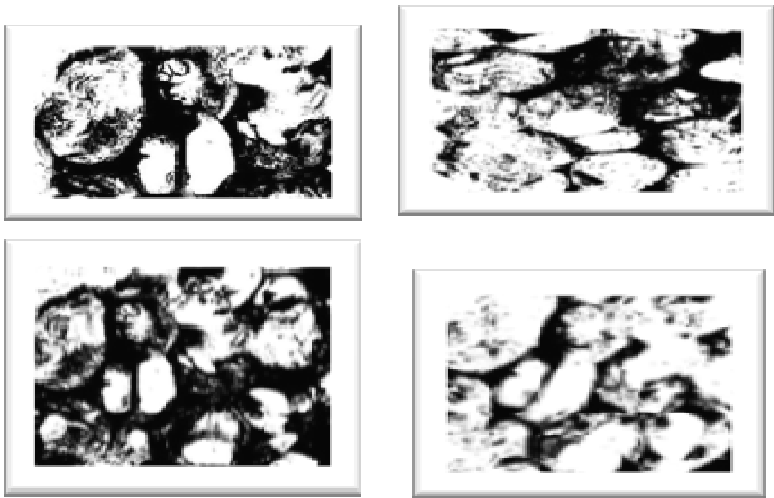


Figura 36. Imagens binarizadas das amostras das espumas cerâmica B

É possível observar que os poros da espuma B apresentam maior variação no tamanho de poro do que a espuma A, Figura 37.

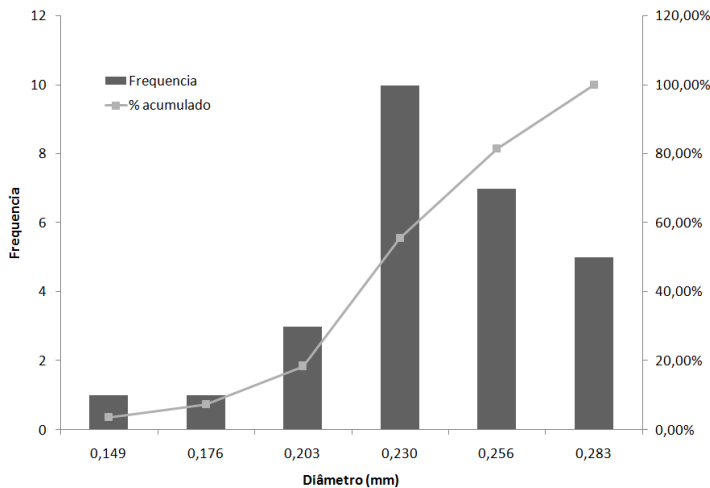


Figura 37. Distribuição de tamanho de poro das espumas cerâmicas B

Na Tabela 7 se apresentam os resultados da porosidade obtida na análise de imagem e mediante a relação com a densidade relativa. Observou-se que as duas porosidades apresentam valores semelhantes. A variação nos resultados pode estar relacionada ao método de medição. Quando a porosidade é calculada através da relação com a densidade relativa, considera-se o volume todo da amostra, enquanto que a calculada na análise de imagem com o Software Imago[®] é uma aproximação ao que seria a porosidade real da amostra, pois o software apenas considera um plano da estrutura.

Tabela 7. Resultados da porosidade determinada pelos diferentes métodos

| | Porosidade | Porosidade Imago[®] |
|-----------------|-------------------|-------------------------------------|
| Espuma A | 69,31 % | 71,05 % |
| Espuma B | 69,65 % | 70,55 % |

4.3.4 Retração volumétrica

As espumas de alumina apresentaram uma retração com a eliminação do poliuretano e posteriormente com a sinterização. Foram medidas as dimensões das 45 amostras (15 para cada temperatura) com um calibrador Mitutoyo. As dimensões das espumas cerâmicas foram comparadas com as das amostras poliméricas e assim poder estabelecer a porcentagem de retração das amostras da sinterização.

Na Figura 38 se mostram as porcentagens de retração das espumas sinterizadas em diferentes temperaturas.

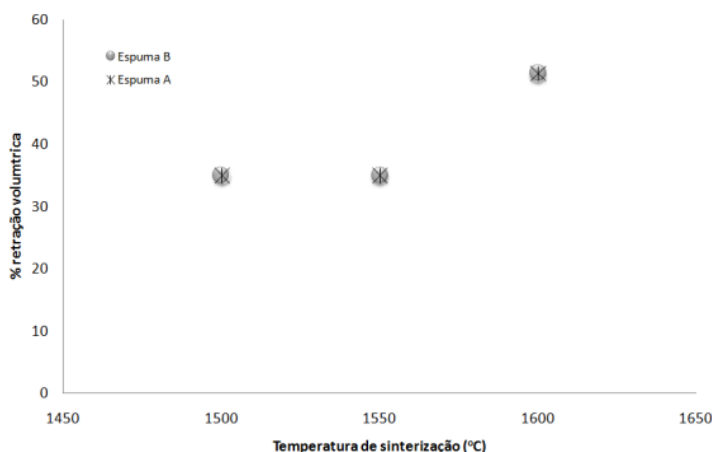


Figura 38. Retração volumétrica das espumas sinterizadas em diferentes temperaturas de sinterização

Nas temperaturas de 1500°C e 1550°C houve uma retração de aproximadamente 35%, enquanto que as amostras sinterizadas a 1600°C apresentaram 51% de retração. Isso se deve a que no tratamento térmico (degradação térmica do poliuretano e sinterização) as partículas se compactam, o que resulta na redução no volume da estrutura final.

Na Figura 39, se mostra uma fotografia das espumas sinterizadas a 1550°C e 1600°C, onde é possível observar a redução de tamanho das espumas.

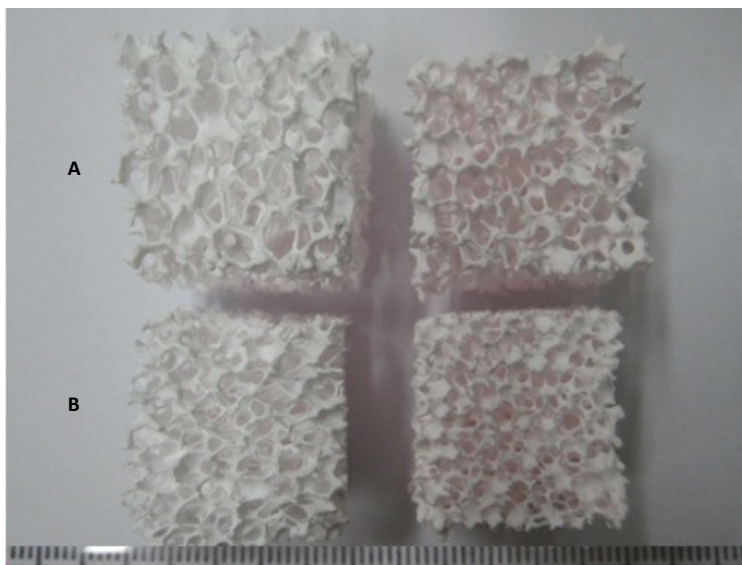


Figura 39. Amostras sinterizadas a 1550°C (esquerda) e 1600°C (direita)

É evidente que houve uma retração e também uma mudança de cor na espuma. Na temperatura de 1550°C, a espuma apresentava uma coloração branca, semelhante ao pó de alumina, mas à 1600°C a cor se tornou rosada, devido provavelmente à presença de impurezas em quantidade minoritárias que levaram a formação de novas fases.

4.3.5 Densidade relativa e porosidade

Os resultados da porosidade das espumas cerâmicas A apresentados no gráfico de dispersão (Figura 40), indicam que a temperatura está diretamente ligada com a porosidade da estrutura cerâmica. Quando as temperaturas de sinterização são 1500 e 1550°C, a porosidade fica dentro da faixa de 65 – 80%. Já na temperatura de sinterização de 1600°C, a porosidade diminui, ficando dentro de uma faixa de 50 – 70%. A diminuição na porosidade com a temperatura de sinterização é de se esperar, pois em temperaturas mais altas há uma maior redução de volume na estrutura porosa.

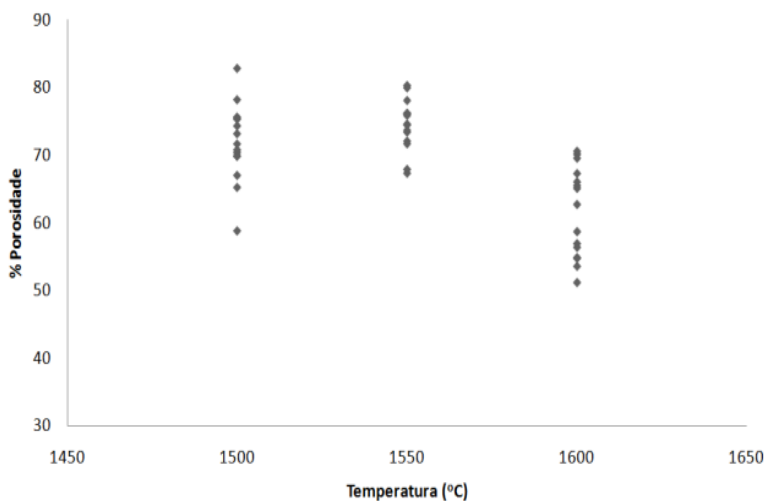


Figura 40. Distribuição de porosidade da espuma cerâmica A com a temperatura de sinterização

Da mesma forma que com a espuma A, a porosidade da espuma B apresenta valores maiores nas temperaturas de 1500 e 1550°C, oscilando entre uma faixa de 65 – 80%. Já para a temperatura de sinterização de 1600°C, a faixa de porosidade diminui, ficando aproximadamente entre 55 e 72%, Figura 41.

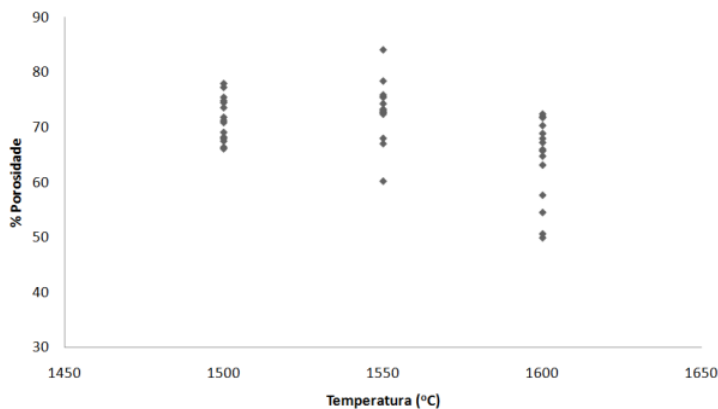


Figura 41. Distribuição de porosidade da espuma cerâmica B com a temperatura de sinterização

Na Tabela 8 se apresenta o resultado do calculo da densidade relativa e a porosidade das espumas poliméricas, utilizando os dados de densidade proporcionados pelo fabricante.

Tabela 8. Densidade relativa e porosidade das espumas de poliuretano

| | Espuma A | Espuma B |
|---|----------|----------|
| Densidade sólida (g/cm ³) | 0,94 | 1,04 |
| Densidade aparente (g/cm ³) | 0,025 | 0,025 |
| Densidade relativa | 0,026 | 0,024 |
| Porosidade (%) | 97,4 | 97,6 |

Comparando os resultados obtidos no cálculo da porosidade da espumas cerâmicas e poliméricas, observa-se uma diminuição na porosidade da réplica cerâmica em relação à espuma de poliuretano devido ao aumento de espessura das paredes da célula e devido às células fechadas por causa da impregnação com a suspensão de alumina. Embora tenha havido uma redução na porosidade da espuma, os resultados obtidos apresentam uma boa faixa de porosidade.

Na Figura 42 se observa o comportamento da resistência mecânica em função da densidade relativa.

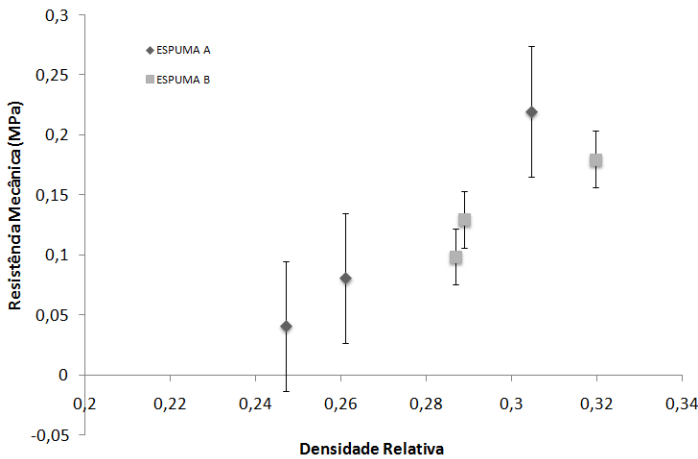


Figura 42. Resistência mecânica vs. densidade relativa

Dos resultados obtidos é possível observar que à medida que a densidade relativa aumenta, a resistência mecânica aumenta. O mesmo fenômeno se apresentou nas pesquisas de COLOMBO E BERNARDO (2003) e JIANG et al (2007) onde, embora as estruturas porosas estudadas não foram do mesmo material, apresentaram o mesmo comportamento, aumentando a resistência mecânica a compressão com a densidade relativa.

4.3.6 Resistência à flexão a alta temperatura

Os ensaios mecânicos de resistência à flexão a alta temperatura para as amostras A e B sinterizadas a 1600°C são mostrados na Figura 43. Os testes foram feitos 800°C, temperatura máxima que resistiram os corpos de prova, sem esfarelar instantaneamente. É possível observar que a amostra A apresentou uma resistência a flexão muito baixa alcançando um valor máximo de 0,01 MPa. No caso da espuma cerâmica B, observa-se que esta apresenta um valor mais alto, em torno de 0,17 MPa.

A baixa resistência da espuma A pode ser atribuída à alta porosidade da estrutura e ao tamanho dos poros, os quais são consideravelmente maiores aos da espuma B, do ponto de vista macroscópico. Outra possível causa da baixa resistência da espuma A é a espessura das paredes das células, que na espuma A é mais prejudicial na resistência mecânica da estrutura, devido ao maior tamanho dos poros que ela apresenta. Os resultados da resistência à flexão da espumas B concordam com os da resistência à compressão, apresentando um comportamento similar, com valores de tensão muito próximos.

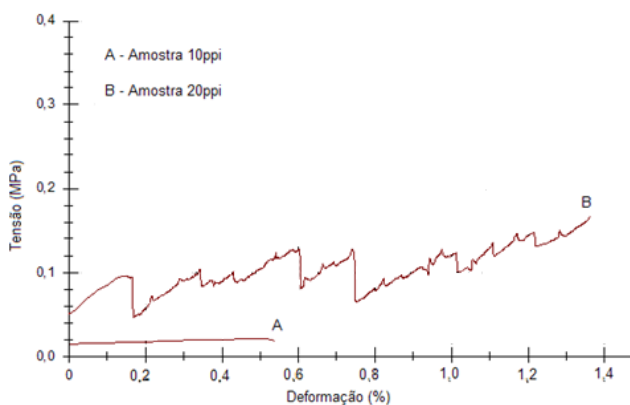


Figura 43. Ensaio de resistência mecânica a 800°C das espumas A e B sinterizadas a 1600°C

4.3.7 Permeabilidade

A Figura 44 e a tabela 9 mostram os resultados da permeabilidade (Fluxo de ar) medida das espumas cerâmicas sinterizadas a 1600°C e de poliuretano.

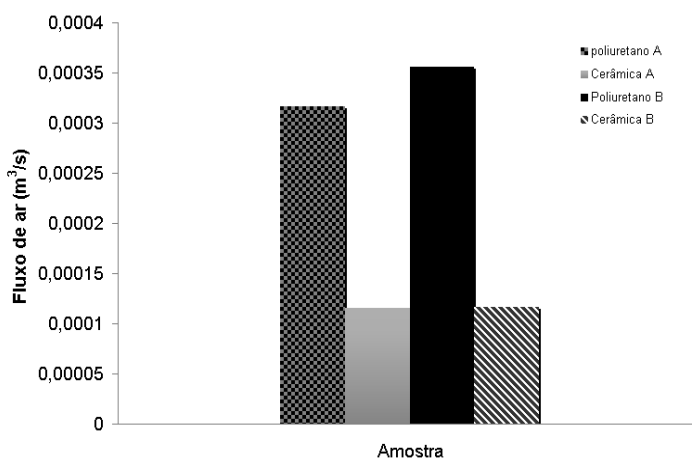


Figura 44. Comparação da permeabilidade (valor de fluxo de ar) das espumas de poliuretano e espumas cerâmicas

Tabela 9. Valores fluxo de ar

| | Poliuretano | Cerâmica |
|----------|--------------------|-----------------|
| A | 0,000316 | 0,000115 |
| B | 0,000356 | 0,000117 |

A permeabilidade das amostras replicadas é menor do que a permeabilidade das espumas poliméricas. Uma redução de 36,4% foi encontrada no valor da permeabilidade entre a espuma de poliuretano A (template) e sua réplica, enquanto que a redução para a espuma B foi de 32,8%. Observa-se também que a réplica B é 1,5% mais permeável do que a réplica A. os resultados da permeabilidade corroboram os resultados da porosidade. Pode-se afirmar que quanto menor é a porosidade, menor é a permeabilidade.

4.4 Testes como Queimadores radiantes

Mediante os testes realizados no LABCET (Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos/UFSC), foi possível determinar se as estruturas cerâmicas de alumina obtidas serviam para ser utilizadas como meio poroso na fabricação dos queimadores radiantes. Além disso, puderam ser avaliados os fatores que afetam o desempenho da estrutura porosa dentro do queimador. Para os testes de combustão foi montado um queimador composto por duas cerâmicas de 3 cm de diâmetro e 2 cm de espessura cada, isolados com fibra de alumina.

Na figura 45 é possível observar o processo de estabilização de uma chama premisturada de gás natural e ar no queimador. A chama é iniciada na superfície do queimador, onde permanece enquanto a matriz porosa continua suficientemente fria (a-c). A partir de determinada temperatura do meio poroso a chama alcança condições favoráveis para sua propagação no interior da estrutura sólida. Esta frente de combustão se desloca através do meio poroso até encontrar a posição de estabilização (d-f). A posição de estabilização, por sua vez, é aquela na qual o balanço de energia no queimador resulta em uma velocidade de chama que se igual à velocidade de escoamento da mistura reagente (PEREIRA, 2002).

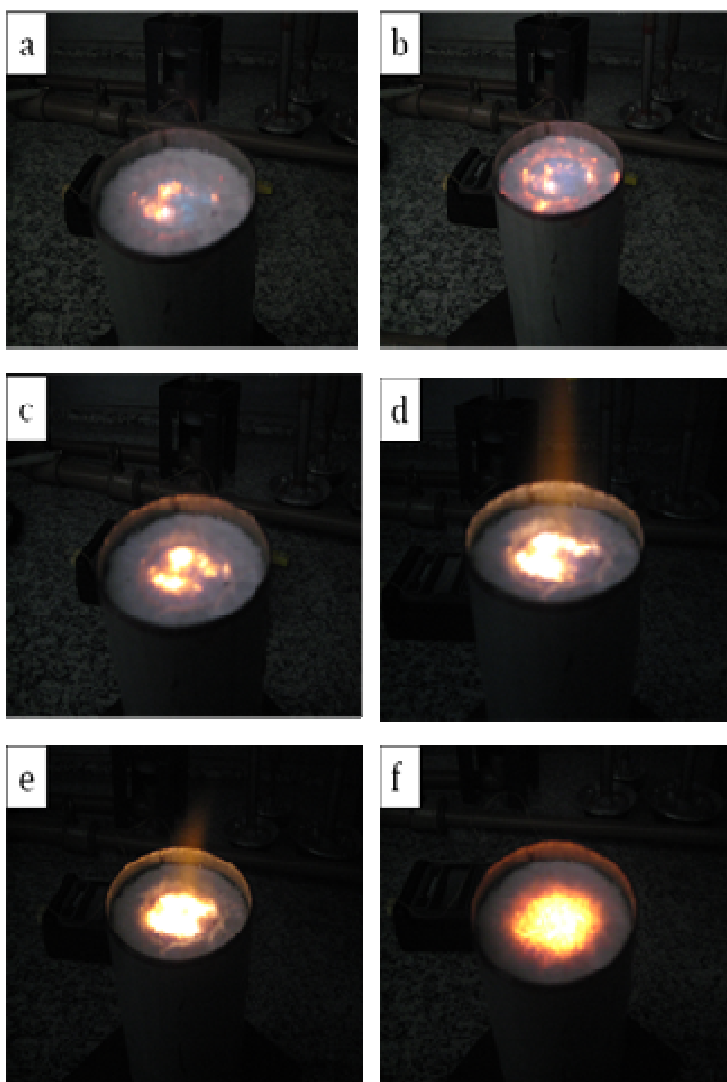


Figura 45. Sequência de como a chama entra na estrutura porosa

Os testes consistiram em determinar as vazões e a proporção entre ar e combustível que conseguiam manter a frente de chama no interior da cerâmica.

Durante os testes foi possível observar que a chama permaneceu dentro da estrutura, como se mostra na Figura 46, onde se evidencia a incandescência da cerâmica.



Figura 46. Imagem do queimador com a chama completamente dentro da estrutura porosa

Foi medida temperatura da superfície da cerâmica com termopares tipo R e as vazões de ar e combustível a partir de um medidor e regulador de vazão. Os testes de combustão foram realizados com uma mistura reagente contendo 5% de combustível em volume (100% de excesso de ar). A velocidade de chama foi definida como sendo igual à vazão volumétrica dos reagentes dividida pela seção transversal do meio poroso. Chamas estáveis foram obtidas para velocidades de chamas entre 30 e 36 cm/s. A figura 47 mostra a temperatura superficial do queimador em função das velocidades de chama obtidas.

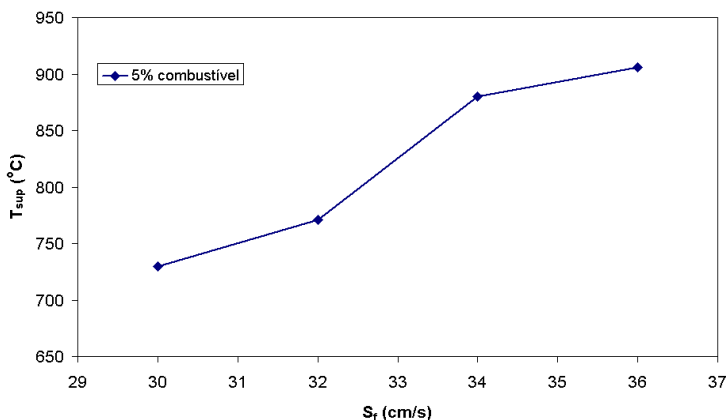


Figura 47. Temperatura superficial vs. velocidade da chama

Foram realizados testes para velocidades de chama variando de 28 cm/s a 36 cm/s. No limite inferior (28 cm/s) a chama não alcançou uma configuração estável, apresentando uma lenta diminuição da temperatura da superfície até a extinção. Assim, o limite inferior de estabilidade do queimador foi determinado pelas perdas de calor para o ambiente e não por retorno de chama.

Entre 30 e 36 cm/s chamas estáveis foram produzidas com temperatura superficial variando aproximadamente entre 700 e 900 °C. No entanto, os repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento, aos quais o queimador foi submetido, aliados às elevadas temperaturas alcançadas pela matriz porosa nestes períodos transientes ($T_{\text{sup}}=1150^{\circ}\text{C}$) levaram a uma fragilização excessiva da espuma cerâmica. Isto impediu a continuidade dos testes e a determinação do limite superior de estabilização do queimador para a mistura combustível/ar em estado. Na figura 48 se mostram imagens do queimador após os testes, onde se evidencia a cerâmica fraturada em parte de sua estrutura.

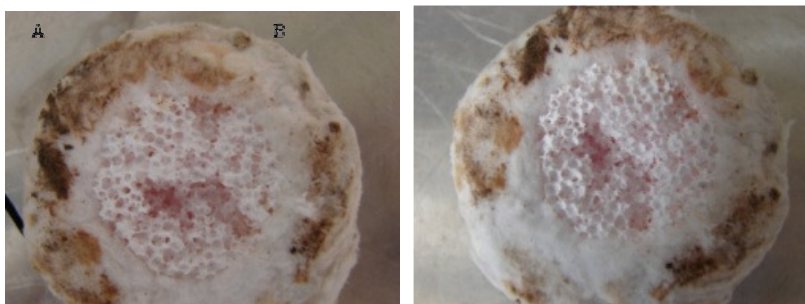


Figura 48. Imagens da estrutura cerâmica do queimador após os testes de combustão

Segundo SCHEFFLER E COLOMBO (2004), PEREIRA (2002) e CATAPAN (2007), a faixa de operação dos queimadores depende diretamente da aplicação. Por exemplo, nos processos industriais que requerem aquecimento por radiação, os queimadores em geral, operam em altas temperaturas ($>1000^{\circ}\text{C}$). Nas aplicações domésticas as temperaturas de operação dos queimadores são menores.

Os resultados obtidos nos testes das espumas cerâmicas nos queimadores radiantes porosos estão de acordo com os testes de resistência mecânica a alta temperatura (resistência à flexão), pelos quais a resistência das espumas diminuiu consideravelmente quando submetidas a esforços a altas temperaturas. Também coincidem com os testes da resistência mecânica a temperatura ambiente, pelos quais a cerâmica se mostrou pouco resistente quando comparada com resultados reportados em pesquisas prévias, onde as estruturas porosas de alumina apresentam uma faixa de operação de até 1600°C (SCHEFFLER E COLOMBO, 2004; PEREIRA, 2002; CATAPAN, 2007).

CAPITULO 5: CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Foram obtidas espumas de alumina a partir de espumas de poliuretano mediante a implementação do método da réplica, onde foi possível obter estruturas cerâmicas com características iguais ou muito próximas às da espumas de sacrifício.

Dos testes realizados para a obtenção da composição adequada da suspensão, a melhor impregnação da espuma polimérica foi a de composição de 60% de sólidos (alumina), 5% de ligante (acrílico), 1% dispersante (polimetacrilato de amônio) e 34% de meio dispersante (água).

Comprovou-se que os aditivos (ligante, dispersante) são determinantes na reologia da suspensão, na impregnação das espumas e na estrutura final do material celular. O tamanho de partícula do pó cerâmico apresentou grande influência na viscosidade da suspensão, assim como também na posterior impregnação da espuma de poliuretano.

Na avaliação de três temperaturas de sinterização (1500, 1550 e 1600°C), a de 1600°C foi a que apresentou melhores resultados, quanto à resistência a compressão e densificação. Na caracterização das espumas cerâmicas observou-se uma melhora na resistência mecânica e na densificação do material com o aumento da temperatura de sinterização.

Por meio da análise de imagem e da relação com a densidade relativa conclui-se que ambos os métodos são adequados para o cálculo da porosidade. Foi comprovado que a porosidade está diretamente relacionada com a temperatura de sinterização, diminuindo com o aumento da temperatura.

A permeabilidade diminuiu com a diminuição da porosidade.

A cerâmica se tornou frágil e quebradiça quando submetida a ensaio de resistência a flexão alta temperatura, comprometendo seu bom desempenho nos queimadores radiantes porosos.

Durante os testes nos queimadores foi possível manter a chama dentro da cerâmica porosa. Foram testadas diferentes velocidades de chama, estabelecendo que na faixa de $30 \leq Sf \leq 36$ cm/s, a chama se estabilizou e queimador funcionou com sucesso embora com pouca durabilidade.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

- Fazer o tratamento térmico (etapa 1, 2 e 3) em um mesmo forno para observar a influência na estrutura e resistência final do material cerâmico celular.
- Realizar um estudo mais detalhado da suspensão com o objetivo de melhorar a impregnação e aderência dela nas espumas de poliuretano e melhorar as propriedades finais das estruturas.
- Avaliar a influência das impurezas na alumina sobre as propriedades finais das estruturas celulares, e determinar se estas afetam de maneira significativa o desempenho das cerâmicas celulares.

CAPITULO 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS NETO, Benicio; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2 ed., Campinas: UNICAMP, 1995, 299 p.

BINNER, Jon; SAMBROOK, Rod. Ceramic Foams – Processing and Applications as Filters, Interpenetrating Composites and Biomedical Materials. Disponível em: <HU<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1869UH>>. Acesso em: outubro de 2008.

CATAPAN, Rafael C. **Estudo do mecanismo combinado térmico e fluidodinâmico de estabilização de chama em um queimadores poroso radiante e sua operação em ambiente de elevada temperatura**. 2007, 146 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis SC, Brasil, 2007.

COLOMBO, Paolo; BERNARDO, Enrico. Macro- and micro-cellular porous cermics from preceramic polymers. *Composites Science and Technology*, v. 63, p. 2353-2359, 2003.

DINGER, Dennis R. **Characterization techniques for ceramist**. Clemson, SC : D. Dinger, 2005, 271 p.

DINGER, Dennis R. **Rheology for ceramists**. Clemson, SC : Dinger Ceramic Consulting Services, Morris Publishing, 2002, 213 p.

FLORES, S. M. P.; NEVES, R. F. Alumina para utilização cerâmica, obtida a partir do rejeito de beneficiamento de caulim. *Cerâmica*, v. 43, p. 283-284, 1997.

GIBSON, Lorna J. **Cellular solids: structure and properties**. 2. Ed. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 1997, 510 p.

GOMES, Cynthia M. **Avaliação do comportamento reológico de suspensões cerâmicas triaxiais utilizando abordagem do delineamento de misturas**. 2004, 127 f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Ciên-

cia e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis SC, Brasil, 2004.

JIANG, Bing; WANG, Zejun; ZHAO, Naiquin. Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams. *Scripta Materialia*, v. 56, p. 169-172, 2007.

LÁNÍK. Los principios de filtración y los tipos de filtros. Disponível em: <HU<http://www.lanik.cz/sprincipyfiltrace.php>UH>. Acesso em outubro de 2008.

MACOSKO, Christopher W. **Rheology: principles, measurements and applications**. New York: Wiley-VCH, 1994, 550 p.

PEREIRA, Fernando M. **Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes**. 2002, 102 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis SC, Brasil, 2002.

REED, James. **Principles of ceramics processing**. 2. Ed., New York: John Wiley & Sons, 1995, 486 p.

REY VILLALBA, Andrés. **Estudio y evaluación de la morfología de las espumas poliuretano flexible para ser usadas como medio de obtención de estructuras celulares cerámicas**. 2006, 85 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica), Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colômbia, 2006.

RICHERSON, David W. Aluminium Industry. In: FREITAG, Douglas W.; RICHERSON, David W. Opportunities for advanced ceramics to meet the needs of the industries of the future. USA, December 1998, p. 7-1 – 7-14.

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M; PANDOLFELLI, V.C. Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$. *Cerâmica*, v. 46, n. 298, p. 97-103, 2000.

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M; PANDOLFELLI, V.C. In:fluência das condições de processamento cerâmico na resistência mecânica e na permeabilidade dos filtros de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$. *Cerâmica*, v. 48, n. 307, p. 121-125, 2002.

SARMIENTO, Andrés F. **Fabrication and characterization of glass-ceramic cellular structures by the replication method**. 2006, 127 f. Trabalho de conclusão de graduação em Engenharia Mecânica), Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colômbia, 2006.

SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo. **Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2004, 645 p.

SOUSA, E.; SILVEIRA, C.B.; FEY, T.; GREIL, P.; HOTZA, D.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. LZSA glass ceramic foams by replication process. *Advances in Applied Ceramics*, v. 104, n. 1, p. 22-29, fev. 2005.

STUDART, A. R., GONZENBACH, U. T.; TERVOORT, E.; GAUCKLER, L. J. Processing routes to macroporous ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 89, n. 6, p. 1771-1789, jun. 2006.

WEAIRE, D e PHELAN, R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. *Philosophical Magazine Letters*, v. 69, p. 107-110, 1994.

ZHU, X; JIANG, D; TAN, S. The control of slurry rheology in the processing of reticulated porous ceramics. *Materials Research Bulletin*, v. 37, n. 3, p. 541-553, março. 2002.

YONG-SHENG, Han; JIAN-BAO Li; QIANG-MIN Wei; KE Tang. The effect of sintering temperatures on alumina foam strength. *Ceramics International*, v. 28, p. 754-759, 2002.